

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Modelování hybridních soustav elektromobilů
Simulation of Electric Vehicle's Hybrid Systems

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Filip Děrgel**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T015 Elektronika
Téma: **Modelování hybridních soustav elektromobilu**
Simulation of Electric Vehicle's Hybrid Systems

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte průzkum současného stavu hybridních vozidel a elektromobilů.
2. Vytvořte simulační model elektromobilu s jednozdrojovou a s vícezdrojovou – hybridní jednotkou elektromobilu.
3. Proveďte komparaci spotřeby energie pro jednozdrojovou a hybridní jednotkou elektromobilu.

Seznam doporučené odborné literatury:

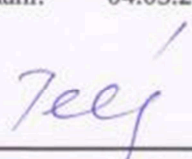
- Křupka, J., Kašparová, M.: Modelování v kostce pro Matlab a Simulink, Univerzita Pardubice 2009.
- Dub, M.: Modelování a simulace elektrických pohonů v programu MATLAB – Simulink, Univerzita obrany, Brno 2010.
- Kupka, L.: Matlab & Simulink : úvod do použití, Lanškroun 2007.
- Zaplatílek, K., Doňar, B.: MATLAB pro začátečníky, Praha: BEN 2005.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Vaculík**


Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Petru Vaculíkovi, Ph.D. za odborné vedení, hodnotné rady a příjemnou spolupráci při vypracování této diplomové práce.

Datum: 4.5.2012

Podpis: *Děrgel Filip*

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá modelováním hybridních soustav elektromobilů. Hlavním cílem jsou modelové soustavy jednozdrojové a vícezdrojové jednotky elektromobilu a jejich následná komparace spotřeby energie.

Teoretická část diplomové práce popisuje význam a funkci jednotlivých typů hybridních vozidel, elektromobilu a hybridních elektromobilů. Důvodem užití vícezdrojové jednotky elektromobilu je v ošetření velkých provozních proudových špiček pomocným zdrojem energie, což způsobí v soustavě elektromobilu větší efektivitu. Praktická část se zabývá modelováním jednozdrojové a vícezdrojové soustavy elektromobilu a její podrobným popisem a komparací výsledků obou soustav s ohledem na spotřebu energie.

Klíčová slova:

hybridní vozidlo, elektromobil, hybridní elektromobil, hybridní soustavy, koncepce zdrojových systému, akumulátor, ultrakapacitor, Matlab – Simulink, emise.

ABSTRACT

This thesis deals with modelling of hybrid systems for electromobility. The main aim are model systems of single-source and multi-source units for electromobility and follow-up comparison of their energy consumption.

A theoretical part of this thesis describes the importance and function of individual type of hybrid vehicles, electromobility and hybrid electromobility. The reason of multi-source unit usage of electromobility is in treatment of high operational current peaks with secondary energy source which leads into a higher effectivity in electromobility system. A practical part looks into a modelling of single-source and multi-source electromobility system and their detailed descriptions and provides comparison of results as for both of these systems regarding energy consumptions.

Key words:

Hybrid vehicle, Electromobility, Hybrid electromobility, Hybrid systems, Designs of source systems, Accumulator, Ultracapacitor, Matlab – Simulink, Emission

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

VELIČINA	ROZMĚR	POPIS
a	$[m.s^2]$	zrychlení
a^*	$[m.s^2]$	žádaná hodnota zrychlení
A_x	$[m^2]$	čelní plocha vozidla
C_{bat}	$[Ah]$	kapacita baterie
c	$[-]$	konstrukční konstanta stroje
c_x	$[-]$	aerodynamický koeficient
F_h	$[N]$	hnací síla
F_{oa}	$[N]$	odpor aerodynamický
F_{os}	$[N]$	odpor stoupání
F_{out}	$[N]$	odpor valivého tření
F_{oz}	$[N]$	odpor zrychlení
$F_{z_{pos}}$	$[N]$	složka odporu zrychlení posuvných částí
$F_{z_{rot}}$	$[N]$	složka odporu zrychlení rotačních částí
G	$[N]$	tíha
g	$[N]$	gravitační zrychlení
I	$[A]$	proud
I^*	$[A]$	žádaný proud
i_c	$[-]$	celkový převod mezi motorem a hnacími koly
J	$[kg.m^2]$	moment setrvačnosti pracovního mechanismu
J_k	$[kg.m^2]$	moment setrvačnosti kola
J_m	$[kg.m^2]$	moment setrvačnosti motoru
J_p	$[kg.m^2]$	moment setrvačnosti převodovky
m	$[kg]$	hmotnost
M_z	$[Nm]$	moment pracovního mechanismu
M_m^*/M_{zr}^*	$[Nm]$	žádaný moment motoru
n	$[min^{-1}]$	otáčky motoru
P	$[W]$	výkon
P^*	$[W]$	žádaný výkon
Q	$[Ah]$	kapacita baterie
r_{di}	$[m]$	skutečný poloměr kola
r_{ki}	$[m]$	valivý poměr kola
s	$[-]$	(sklon vozovky) stoupání
s^*	$[m]$	žádaná dráha

U	[V]	napětí
v	[m.s ⁻¹]	rychlost vozidla
v ₀	[m.s ⁻¹]	rychlost protivětru
v [*]	[km.h ⁻¹]	žádaná rychlost
W	[J]	energie
W [*]	[J]	žádaná energie
Zk	[kg]	zatížení kol

VELIČINA	ROZMĚR	POPIS
$\Delta h/\Delta l$	[-]	stoupání
η	[-]	účinnost
α	[°, rad]	úhel stoupaní vozovky
ξ	[-]	koeficient valivého tření
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota vzduchu
\emptyset	[Wb]	magnetický tok

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ZKRATKY	POPIS
AC	střídavá hodnota napětí nebo proudu
CO ₂	oxid uhličitý
DC	stejnosměrná hodnota napětí nebo proudu
LiFePO ₄	Lithium Iron Phosphate – lithium, železo, fosfát
M	slitina
MH	hydroxid kovu
Ni	nikl
Z. E.	Zero Emissions – nulové emise
ZEV	Zero Emission Vehicle – vozidlo s nulovými emisemi

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 HYBRID	10
1.1 Rozdělení hybridu	11
1.1.1 Mikro hybrid	11
1.1.2 Mild hybrid	11
1.1.3 Full hybrid.....	11
1.1.3.1 Sériový hybrid	12
1.1.3.2 Paralelní hybrid	13
1.1.3.3 Kombinovaný hybrid.....	15
1.2 Příčiny použití hybridních pohonů.....	16
1.3 Výhody a nevýhody hybridních pohonů.....	17
1.3.1 Výhody hybridních pohonů:	17
1.3.2 Nevýhody hybridních pohonů:	17
2 ELEKTROMOBILY	18
2.1 Koncepce zdrojových systému.....	19
2.1.1 Systém akumulátor – měnič – motor	19
2.1.2 Systém ultrakapacitor – měnič – motor	19
2.2 Výhody a nevýhody elektromobilů.....	20
2.2.1 Výhody elektromobilů:	20
2.2.2 Nevýhody elektromobilů	21
3 HYBRIDNÍ ELEKTROMOBIL	22
3.1 Koncepce zdrojových systémů.....	23
3.1.1 Systém akumulátor – ultrakapacitor – měnič – motor.....	23
3.1.2 Systém palivový článek – ultrakapacitor – měnič – motor.....	24
3.1.3 Systém akumulátor – měnič – motor, ultrakapacitor – měnič – motor.....	24
3.2 Výhody a nevýhody hybridních elektromobilů.....	25
3.2.1 Výhody ultrakapacitorů	25
3.2.2 Nevýhody ultrakapacitorů.....	25
4 SIMULAČNÍ PROGRAM MATLAB	26
4.1 Matlab	26
4.1.1 Proč se používá	26
4.2 Simulink.....	26

4.2.1	Popis funkce Simulink	27
5	POPIS SIMULAČNÍCH SOUSTAV	29
5.1	Vytvoření simulačního modelu s jednozdrojovou jednotkou elektromobilu	29
5.2	Vytvoření simulačního modelu s vícezdrojovou jednotkou elektromobilu	40
6	SIMULAČNÍ VÝSLEDKY	49
	ZÁVĚR	69
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	71

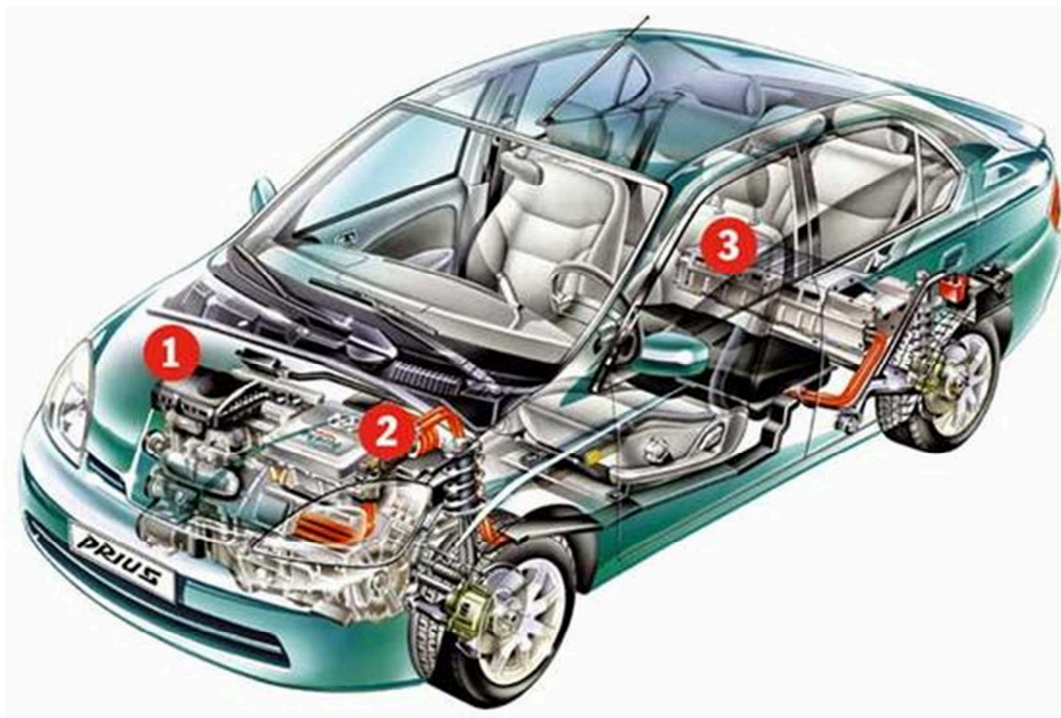
ÚVOD

V dnešní době jsou nejvíce používány v automobilech spalovací motory. Spalovací motor se stal nejpoužívanějším z mnoha důvodů, jako jsou například jednoduché doplnění paliva, daleko nižší spotřeba paliva ve srovnání s parními pohony, také nízká hmotnost hnacího motoru a v neposlední řadě delšímu dojezdu automobilu se spalovacím pohonem oproti pohonu elektrickému.

S časem se neustále automobilový průmysl modernizuje a modernizují se i pohonné systémy v automobilech, které musí splňovat určité normy. Spalovací motor má s tímto řadu nevýhod, např. nepřilíš velký rozsah otáček, ve kterých motor pracuje se svou největší efektivitou. V dnešní době tento problém souvisí s často diskutovanými dopady na životní prostředí a emisemi. Kvůli těmto předpisům a normám se klade na spalovací motory stále větší nároky. Začaly být doplňovány moderními prvky např. (turbodmychadly, systémy recirkulace výfukových plynů EGR, atd.), aby se splnily požadované normy a předpisy. Ovšem tyto, ani další modernější elektronické systémy nedokáží eliminovat největší nevýhodu spalovacích motorů, která je vypouštění spalovaných zplodin do ovzduší. V důsledku toho vzniká skleníkový efekt působící negativně na planetu. Závažným problémem (i když už nesouvisejícím s konstrukcí spalovacího motoru) jsou snižující se zásoby ropy ve světě a tím zvyšující se nárůst její ceny na světových trzích. Tyto následky vedou k hledání jiných moderních pohonných systémů automobilů. V dnešní době se nejvíce nahrazují spalovací motory hybridními motory nebo už i motory čistě na elektrickou energii. U hybridního pohonu se kombinuje spalovací a elektromotor tak, aby spalovací motor fungoval jen jako doplňující pohonná jednotka, která pracuje pouze při své největší efektivitě. Tím by se emise měly snížit na minimální hodnotu. U elektromobilu pracuje automobil na čistě elektrickou energii, tudíž jejich hodnota emisí je nulová. První tři kapitoly mé práce seznámí čtenáře s hybridními pohony, elektromobily a hybridními elektromobily. Ve čtvrté kapitole je stručně charakterizováno prostředí Matlab, pomocí kterého jsem získal simulační výsledky. V páté kapitole jsou popsány simulační modely jednozdrojové a vícezdrojové soustavy elektromobilu. V šesté kapitole jsou popsány a zhodnoceny jednotlivé simulační výsledky.

1 HYBRID

U hybridního pohonu se využívá kombinace dvou zdrojů energie a to spalovacího motoru a elektromotoru. Při akceleraci vozidla je třeba dodat energii z obou motorů současně. Naopak při rekuperaci, která způsobí obnovení elektrické energie během motorického brzdění nebo jízdy z kopce, je možno vzniklou energii ze spalovacího motoru využít k nabíjení baterie (akumulátoru). Podle potřebné dopravní situace využívá hybridní automobil určité režimy, které jsou pro danou situaci nejvýhodnější z hlediska spotřeby. Elektrický pohon automobilů prakticky neprodukuje žádné škodlivé emise a má nízkou hladinu hluku. Zvyšuje účinnost systému a snižuje spotřebu paliva. Avšak pohon má také menší jízdní výkon, omezený dojezd a vyšší cenu. Zásobník energie je dosud značně rozměrný a těžký oproti obvyklým palivovým nádržím. U hybridních automobilů se již zahájila sériová výroba. První přišla japonská Toyota s automobily s kombinovaným pohonem. Toyota Prius se začala vyrábět již v roce 1997. [2, 9, 16]



Obr. 1. Hybridní vozidlo [13]

Popis obrázku:

1. Motor, 2. Hybridní systém, 3. Vysokonapěťová bateriová soustava

1.1 Rozdělení hybridu

1.1.1 Mikro hybrid

- Prakticky se nejedná o pravé hybridní vozidlo (skládající se ze dvou a více zdrojů energie pro pohon), ale jedná se pouze o klasický automobil se spalovacím motorem, který je doplněn o tzv. motorgenerátor (ten plní dohromady úlohu startéru a alternátoru). Díky této koncepci může být mikro hybrid obdařen moderní technologií Stop&Start, která vypíná motor v případě jeho nepotřeby (křižovatky, krátká zastavení apod.) [10]

Použití: Hyundai ix-Metro koncept, Smart MHD (Micro Hybrid Drive), Citroën C4 1.6 e-HDI [10]

1.1.2 Mild hybrid

- Tuto koncepci již můžeme zařadit do hybridních automobilů. U Mild hybridu se podílí na výkonu i elektromotor, ovšem neposkytuje dostatečný výkon pro samostatné pohánění automobilu. Elektromotor slouží tedy jako podpůrný systém klasickému spalovacímu motoru při akceleraci nebo využití rekuperované energie při brzdění. V podstatě se jedná o koncepci, kterou lze zařadit mezi Mikro hybridy a Full hybridy. [10]

Použití: Honda Insight koncept, Honda CR-Z koncept (Compact Renaissance Zero), BMW ActiveHybrid 7 [10]

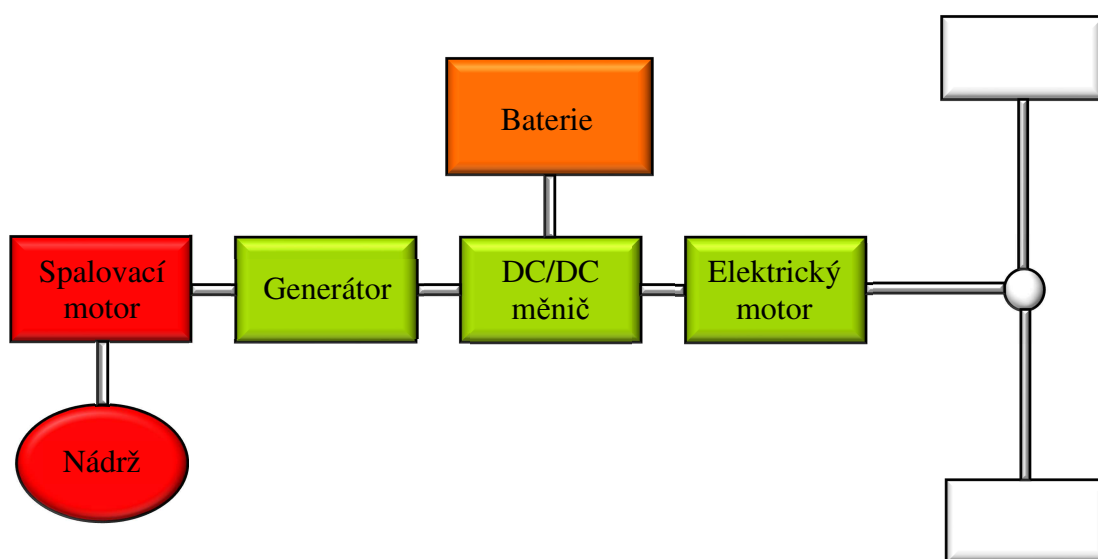
1.1.3 Full hybrid

- Jedná se o automobil s hybridním pohonem (spalovací motor + elektromotor). Díky použití výkonového elektromotoru se může automobil pohybovat i pouze na čistě elektrickou energii. Při tomto režimu automobil samozřejmě neprodukuje žádné emise do okolí (tzv. režim Z. E. = zero emissions). Vzdálenost ujetých kilometrů na čistě elektrickou energii závisí na velikosti zvolené kapacity akumulátoru a na odebíraném výkonu elektromobilu. [10]
- Při nedostatečné energii v akumulátoru se spouští spalovací motor, který buď pohání automobil, nebo pracuje pouze jako generátor pro znovu obnovení energie v akumulátoru (tzv. dobíjení). Spalovací motor při nabíjení akumulátoru proto nevytváří točivý moment pro pohánění kola automobilu. Točivý moment v tomto režimu obstarává elektromotor. [10]

Použití: Toyota FT-CH koncept, Hyundai I-flow koncept, či Peugeot SR1 koncept [10]

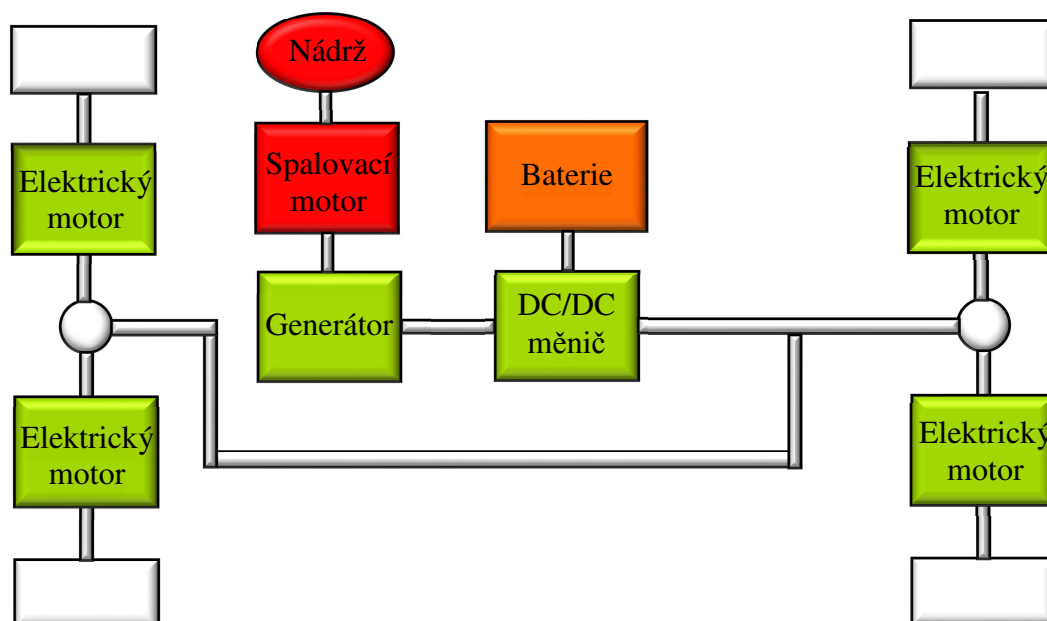
1.1.3.1 Sériový hybrid

- U sériových hybridů se používá jeden nebo více elektromotorů pro pohon automobilu (obrázek č. 2). Například automobilka Audi E-tron používá elektromotor pro každé jednotlivé kolo zvlášť, jak je znázorněno na obrázku č. 3. Spalovací motor není spojen s hnacími koly, může tedy být optimalizován pro efektivní běh, čímž se snižuje jeho spotřeba paliva. Tímto dosahujeme teoretického limitu efektivity 37%, zatímco běžně je v autech dosahována účinnost zhruba 20%. [11]



Obr. 2. Sériový hybrid [11]

- Sériový hybridní pohon je obdobný jako vozy na čistě elektrický pohon. Spalovací motor pohání generátor, není tedy jako u klasického automobilu spojen přímo s hnací nápravou. Generátor vykonává dvě základní funkce – dobíjí baterii, nebo dodává energii hnací nápravě elektromotoru. Když chceme dosáhnout maximálního výkonu, je třeba odevzdat energii jak z baterie, tak z generátoru. U této koncepce sériového hybridního pohonu není nutné zapojit převodovku, protože elektromotor má značně větší rozsah otáček, než má spalovací motor. V sériovém hybridu se můžeme ještě setkat s superkapacitory či akumulátory kinetické energie. [11]



Obr. 3. Sériový hybrid 4x4 [11]

Výhody sériových hybridů:

- otáčky spalovacího motoru nejsou závislé na otáčkách kol
- větší možnosti při navrhování vozidla
- spalovací motor může být nahrazen jiným zdrojem energie (plynovou turbínou)
- jestliže je elektromotor uložen v nábojích kol, není nutné použití převodovky, diferenciálu nebo hnací hřídele a díky tomu je podlaha níže

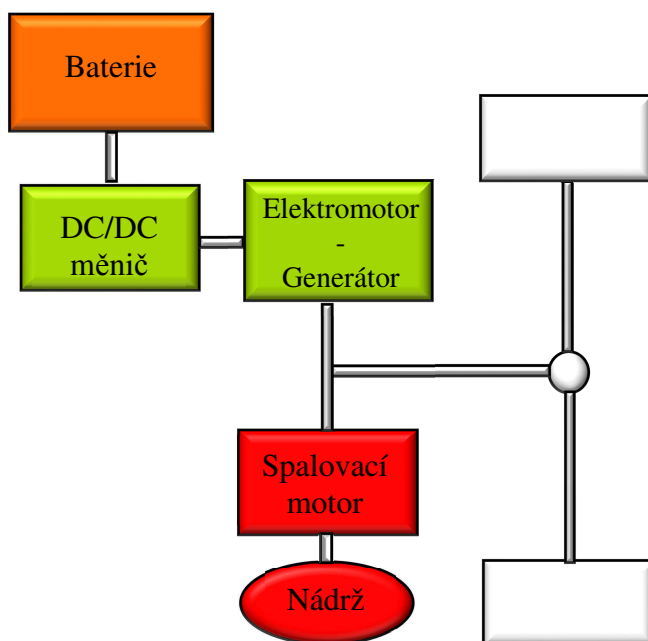
Nevýhody sériových hybridů:

- výrazné zvýšení hmotnosti vozidla
- odstranění mechanického spojení spalovacího motoru s poháněnými koly vede k poklesu účinnosti pohonu (mechanická cesta (98%) má větší účinnost než elektrická (75%))

1.1.3.2 Paralelní hybrid

- V průmyslové technice se dnes nejvíce používá právě tento paralelní hybridní pohon. Automobil využívá jak spalovací motor, tak elektromotor. Tyto motory jsou s koly spojeny přes mechanickou převodovku. Funkci startéru, ale také alternátoru, plní generátor.

Baterie slouží k akumulaci elektrické energie. Baterie u tohoto systému hybridu má větší napětí, než je to u běžných automobilů. Často bývají pomocné systémy (klimatizace, posilovač řízení) připojeny k elektromotoru, aby byla zvýšená účinnost spalovacího motoru. Tím je zajištěno, že pokud tzv. pomocné systémy nepracují, není jim dodávána energie. [11]

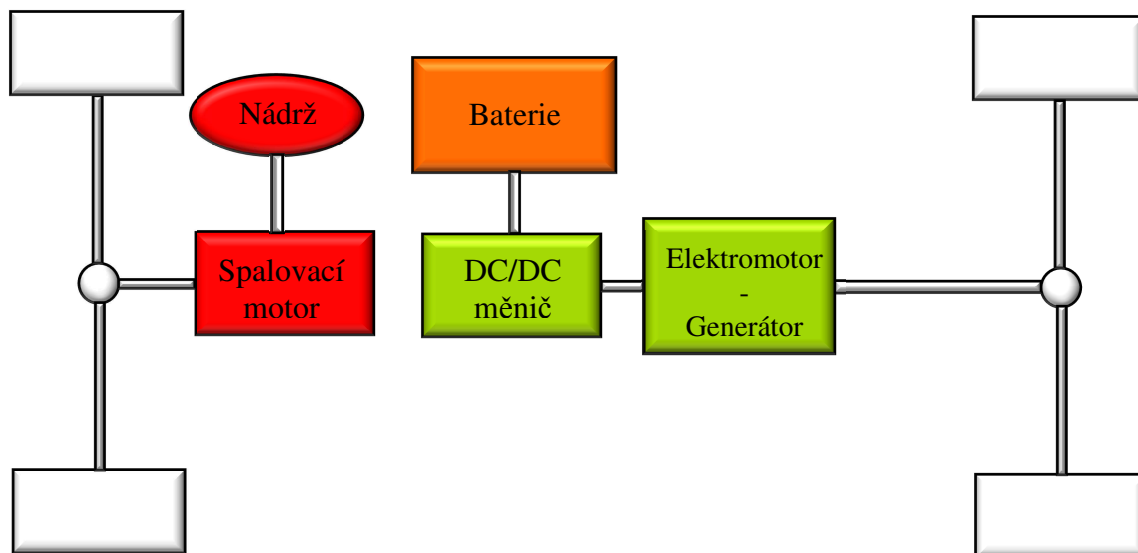


Obr. 4. Paralelní hybrid [11]

- Spalovací motor a elektromotor jsou spojeny hřídeli, jejich výsledný moment se rovná součtu obou okamžitých momentů. Tedy je-li v provozu pouze jeden z motorů, druhý se otáčí stejnou rychlostí jako hnací motor, aniž by dodával do systému výkon. Druhou možností je odpojit nevyužitý motor přes spojku nebo planetovou převodovku. U paralelního hybridu se nejčastěji využívá pro hlavní zdroj výkonu spalovací motor a elektromotor bývá využit například při akceleraci. [11]

Výhody paralelního hybridu:

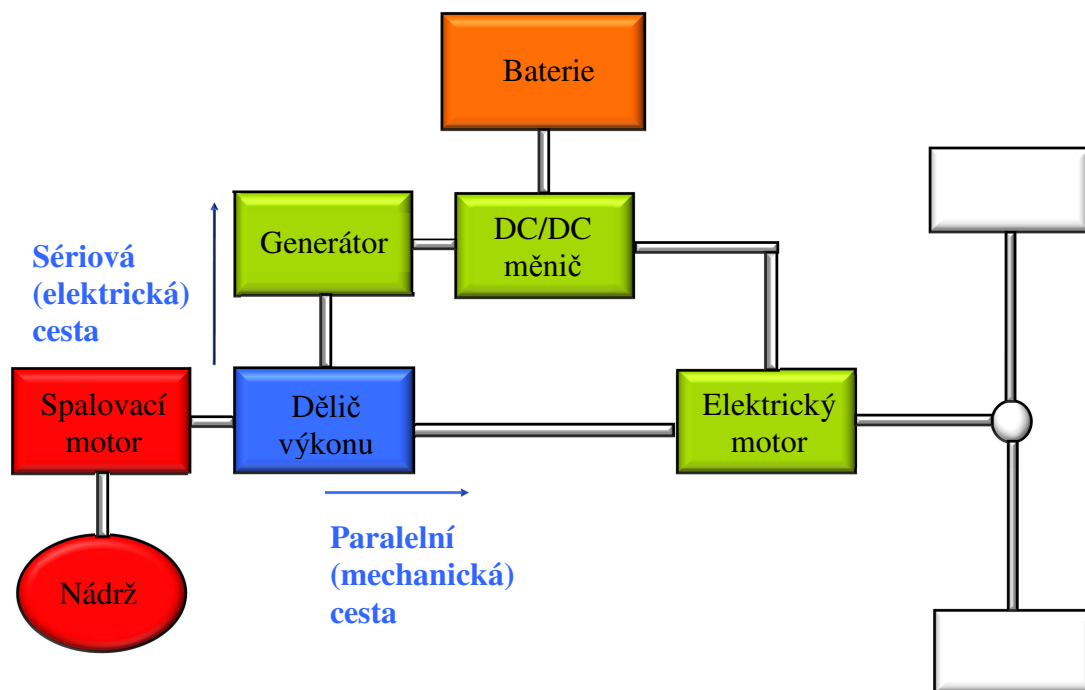
- možná rekuperace energie



Obr. 5. Paralelní hybrid 4x4 [11]

1.1.3.3 Kombinovaný hybrid

- Kombinovaný hybridní pohon je vybaven děličem výkonu. Dělič výkonu nám zajišťuje, aby tok výkonu směřoval buďto mechanickou cestou (paralelní hybridní pohon) nebo elektrickou cestou (sériový hybridní pohon). Podle toho, ve kterém režimu se automobil nachází, bude záviset, kolik procent výkonu směřuje k mechanické či elektrické cestě. Například jsou to režimy akcelpace, brzdění, pomalá jízda (ve městě), rychlá jízda (na dálnici), nebo jízda z kopce. [11]



Obr. 6. Kombinovaný hybrid s děličem výkonu [11]

1.2 Příčiny použití hybridních pohonů

Základním důvodem použití hybridních pohonů je nízká účinnost dnes běžně používaných spalovacích motorů, jejich závislost na ropě a znečišťování životního prostředí. Účinnost běžných spalovacích motorů je 30 až 40%. Z hlediska účinnosti se nedá očekávat vylepšení spalovacích motorů (závisí především na termodynamických jevech). Tato uvedená účinnost spalovacího motoru ovšem platí pouze za optimálních podmínek. Při běžných provozních podmínkách se optimálního stavu dosáhne jen velmi zřídka. Optimální podmínky u spalovacího motoru si můžeme představit jako běh motoru naprázdno. Další nevýhodou spalovacích motorů jsou mechanické ztráty způsobené např. převodovkou. Spalovací motor má omezený rozsah otáček, proto je k němu koncipována převodovka. Oproti spalovacímu motoru má elektromotor daleko vyšší účinnost a to 95 %. Elektromotory mají široký rozsah otáček a zatížení i při vysoké účinnosti.

Vysoká hmotnost akumulátoru, nízký dojezd vozidla na jedno nabití a pomalé dobíjení akumulátoru jsou nevýhody elektromobilů. Tímto spojením pohonů (spalovacího a elektromotoru) vzniká, jak víme z předchozích kapitol, hybridní pohon. U hybridních pohonů nemusí být spalovací motor mechanicky spojen s koly automobilu, může pracovat pouze jako generátor elektrické energie. Spalovací motor může tedy pracovat v optimálních otáčkách, které jsou dostačující pro dobíjení akumulátoru, nebo pohanění elektromotoru. Pokud jsou akumulátory nabitě, nebo probíhá decelerace automobilu, tak je spalovací motor zcela vypnut. Abychom nemuseli použít

převodovku, umístíme elektromotory přímo do kol automobilu. Odbouráním převodovky se ušetří ve vozidle místo pro nejrůznější využití. Ovšem v dnešní době se nejčastěji používá elektromotor pouze jako doplňkový motor pracující v době, kdy spalovací motor nemá velké vytížení a je možné ho nahradit elektromotorem např. popojíždění v koloně, nebo jízda po městě. Spalovací motor bývá spojen pevně s koly automobilů. Hybridních pohonu je celá řada a neustále se vyvíjejí kupředu. Je to vhodná alternativa pro budoucí automobily díky velké účinnosti a dosažení nízkých emisí výfukových plynů. V této komplikované technologii a v moderním vyvíjejícím se odvětví hybridních automobilů, která se žene neustále dopředu, je jen jediná nevýhoda a to jsou vysoké náklady.

1.3 Výhody a nevýhody hybridních pohonů

1.3.1 Výhody hybridních pohonů:

- nízké náklady na provoz
- provozem na elektrickou energii je zaručena tichost a nulové emise
- využití rekuperace např. při deceleraci
- možnost využití více hnacích strojů najednou

1.3.2 Nevýhody hybridních pohonů:

- minimum nabíjecích stanic
- vysoké ceny hybridních pohonů
- příliš vysoká hmotnost hybridní soustavy

2 ELEKTROMOBILY

Elektromobily jsou představovány jako budoucnost osobní dopravy tzv. auto zítřka. Co se tedy schovává pod názvem elektro-auto neboli elektrický automobil? Jednoduše řečeno jde v podstatě o dopravní prostředek poháněný čistě elektrickou energií (elektřinou), lépe řečeno elektromotorem napájeným baterií, solárními panely či generátorem. Ovšem na elektrickou energii se nemusí pohybovat pouze elektromobily, ale také jízdní kola, motocykly, letadla a lodě, dokonce i vesmírné lodě. Počátek elektromobilů se datuje někdy kolem 19. století. V tehdejší době se elektromobily uplatňovaly v mnohem větším rozsahu, než je tomu nyní. Jezdilo tisíce elektrických automobilů. Ovšem bylo to způsobeno tím, že spalovací motory nebyly v tehdejší době tak snadno řízeny a ovládaný jako elektromobily a samozřejmě elektromobily byly tiché a nevypouštěly spalovací zplodiny. Ale ani to nezabránilo postupem času, zejména po 1. a 2. světové válce, nahradit tyto elektromobily spalovacími motory. Dá se říct, že v této době byly masově nahrazeny veškeré elektrické dopravní prostředky (elektromobily, tramvaje) spalovacími pohony (automobily, autobusy). Postupem času se ovšem bohužel zjistilo, vypouštění zplodin z dopravních prostředků znečišťuje planetu v takové míře, že mohou ohrozit její „existenci“. Postupně se svět začal zajímat o pojmy jako je globální oteplování, klimatická krize atd., které znovu vrátily myšlenku, že elektromobily patří k dopravním prostředkům budoucnosti. Na jejich zavedení má v poslední době podstatný vliv kalifornské zákonodárství ZEV (Zero Emission Vehicle – vozidlo s nulovými emisemi). Všude tam, kde jsou nežádoucí výfukové emise a hluk, jsou dnes elektromobily zaváděny např. v pěších zónách na nádražích, na klinikách, letištích apod. Vnitřní prostory velkých měst mají zavedeny tramvaje, trolejbusy, tedy elektromotory s trolejovým přívodem proudu. [3, 12]



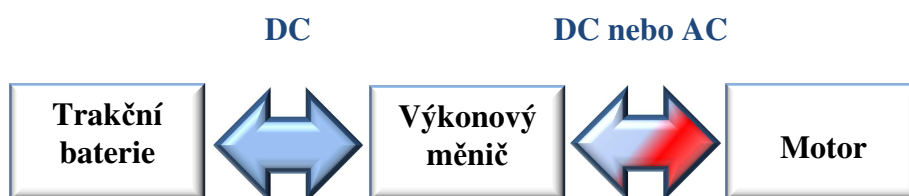
Obr. 7. Elektromobil [14]

2.1 Koncepce zdrojových systému

2.1.1 Systém akumulátor – měnič – motor

V tomto systému se jedná o napájení motoru jen z jednoho zdroje - (trakční baterie). Pohonná soustava se využívá u většiny elektromobilů (obrázek č. 8). Zdroj této soustavy (trakční baterie) je slabinou celého systému. U baterie je podstatná její kapacita, která ovlivňuje dojezd a dynamiku elektromobilu. Ovšem důležitým parametrem baterie je také její hmotnost. Klasická trakční olověná baterie má kapacitu 40 Wh/kg, NiMH 80 Wh/kg, Li-ion 100-250 Wh/kg.

Příklad: nádrž na 40l benzínu odpovídá hmotnosti 30kg, baterie v elektromobilu s dojezdem odpovídající 40l nádrži benzínu by odpovídala hmotnosti u moderních baterií 400-500 kg, u klasických olověných baterií dokonce přes 1000kg. Baterii lze dobíjet z distribuční sítě, nebo přímo ve vozidle pomocí rekuperace při brždění, anebo při jízdě elektromobilu z kopce. [4]



Obr. 8. Blokové uspořádání pohonné jednotky [4]

2.1.2 Systém ultrakapacitor – měnič – motor

V tomto systému je realizovatelné obdobné uspořádání pohonné jednotky jako v předchozím případě (obrázek č. 9). Hlavní rozdíl je ve zdroji elektrické energie, kterým není baterie, ale ultrakapacitor. Ultrakapacitor (neboli ultrakapacitorová baterie) je složen ze sérioparalelního zapojení ultrakapacitorů. Nevýhodou ultrakapacitorové baterie je, že dosahuje pouze malé kapacity (max. 30 Wh/kg), a tedy dovede dodávat energii jen po krátkou dobu. Ovšem dodání, nebo vydání této energie je s podstatně vyšším výkonem (proudem) po krátkou dobu než u klasické (olověné) baterie. [4]



Obr. 9. Blokové uspořádání pohonné jednotky [4]

2.2 Výhody a nevýhody elektromobilů

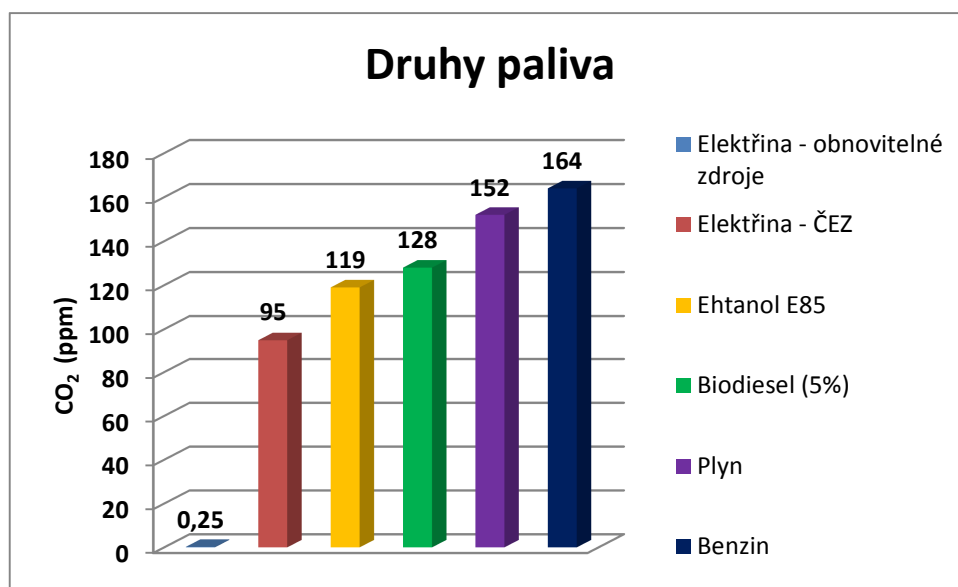
2.2.1 Výhody elektromobilů:

- účinnost převedení energie na pohyb

Účinnost u klasických spalovacích motorů včetně ztrát převodovky je 20 – 30 %. U elektromobilů však odpadají ztráty převodovky a i bez těchto ztrát je jejich účinnost 90 %.

- emise

Druhy paliva a jejich srovnání emisí CO₂ (oxid uhličitý). Z grafu vidíme, že nejlépe na tom jsou elektricky poháněné stroje (obrázek č. 10). (Jednotka ppm se používá pro označení malých koncentrací, udává počet částic na milion).



Obr. 10. Srovnávání emisí

- absence hluku, vibrací a prachu

Elektromotory oproti spalovacím motorům nezpůsobují vibrace a jsou podstatně tišší.

- rekuperace energie

Rekuperace energie znamená, že elektromobil zpětně regeneruje (dobíjí) akumulátor, v praktickém provozu přibližně o 25 %. Rekuperace je dosahováno například jízdou z kopce, při brzdění.

- zjednodušení vozidla

Elektromotory jsou konstrukčně méně náročné, než spalovací motory a mnohem jednodušší na ovládání. Díky široké škále otáček odpadá převodový mechanismus.

2.2.2 Nevýhody elektromobilů

- krátká dojezdová vzdálenost

Dojezdová vzdálenost elektromobilu závisí na typu baterie a jejích parametrech. Vzhledem k neustále modernizaci a pokroku se dojezdová vzdálenost elektromobilů na jedno nabití baterii neustále zvyšuje.

- vysoká pořizovací cena
- nedostatek dobíjecích míst

Vlivem modernizace se eliminuje tato nevýhoda, již dnes existuje v České republice více než 130 dobíjecích stanic.

3 HYBRIDNÍ ELEKTROMOBIL

Hybridní elektromobil představuje nové odvětví využití a zpracování elektrické energie při rekuperaci. Jedná se o pohon složený z trakční baterie a ultrakapacitorů, kde ultrakapacitorová baterie nahrazuje „spalovací motor“ v dosavadních hybridních vozidlech. Ultrakapacitorová baterie slouží jako velký a dostatečně rychlý zásobník elektrické energie a je schopen pojmout velké nabíjecí i vybíjecí proudy. Jeho další výhodou je schopnost pracovat v širokém rozsahu teplot. [1]

Ultrakapacitorová baterie se začala používat v elektromobilu pro lepší využití rekuperované energie elektromobilu. Při koncepci elektromobilu se musí brát v potaz velikost kapacity na úkor hmotnosti. Proto snaha využít energii, kterou vozidlo samo produkuje je nejlepším postupem, jak docílit snadné efektivity a zamezit zbytečným ztrátám. [1]



Obr. 11. Ultrakapacitorová baterie [15]

Ultrakapacitor se v systému používá především ze dvou zásadních důvodů.

- První důvod je rekuperace. Při brzdění, nebo jízdě z kopce vzniká rekuperovaná energie, kterou bychom mohli využít k nabití akumulátoru. Akumulátor se ovšem nabíjí nejlépe při nízkém proudu. Jelikož proud vznikající při rekuperaci je o několik řádů větší než proud vhodný k nabíjení akumulátoru, uloží se tento proud do ultrakapacitoru, který je schopen přijmout i takto vysoké proudy. Při vzniku rekuperované energie v elektromobilu je vhodné, aby ultrakapacitorová baterie byla vybitá. [1]
- Druhým důvodem využití ultrakapacitoru je omezení proudových špiček. Střední hodnotě proudu z trakčního akumulátoru koresponduje výkon dodávaný akumulátorem. Hlavní proudové špičky vznikají v elektromobilu při akceleraci. Jejich omezení a zároveň

vyhlazení na střední hodnotu uskutečníme pomocí zmíněného ultrakapacitorového zdroje. Ultrakapacitor by měl být plně nabit, abychom dosáhli dostatečné pokrytí špiček a snížení zvlnění proudu odebíraného z akumulátoru. [1]

Z těchto dvou důvodů vyplývají dva protichůdné požadavky. Kdy má být ultrakapacitor nabitý a kdy vybitý. Tyto důležité požadavky pak v pohonném systému řeší řídicí jednotka, která musí předpovídat změny tykající se akcelerace a brždění elektromobilu. Podle toho také koriguje vhodné množství energie v ultrakapacitoru. [1]

3.1 Koncepce zdrojových systémů

3.1.1 Systém akumulátor – ultrakapacitor – měnič – motor

V tomto znázorněném systému jsou již použity dva zdroje energie, i když pro výkonový měnič z hlediska vstupu se může jevit zdroj jeden, který je umístěn na stejnosměrné straně výkonového měniče (obrázek č. 12). V systému je hlavním (primárním) zdrojem energie trakční baterie (např. moderní LiFePO_4 články), která je paralelně doplněna o podružný (sekundární) zdroj energie poskládaný z ultrakapacitorů. [4]



Obr. 12. Blokové uspořádání pohonné jednotky [4]

Stejnoseměrný měnič umístěn mezi ultrakapacitorovou baterií a stejnosměrný meziobvod trakčního měniče kontroluje jak řízení vybíjecích a nabíjecích proudů, tak regulaci pro konstantní výstupní napětí z ultrakapacitorů. Hlavním úkolem ultrakapacitorové baterie je, co možná nejrychleji pojmout energii vznikající při rekuperaci elektrické energie a opět elektrickou energii dodat při dynamických dějích pohonu. Zásadní výhodou, proč se používají k těmto účelům ultrakapacity, je jejich nízký vnitřní odpor oproti trakční baterii a že je lze nabíjet či vybíjet při jakékoliv úrovni

nabití velkými proudy, řádově až stovky ampérů. Tedy použitím ultrakapacitorové baterie se zvyšuje nejen účinnost rekuperované energie, ale také dojezdová vzdálenost elektromobilů.

Podle vmontovaného motoru v elektromobilu se volí výkonový (trakční) měnič. Například při použití stejnosměrného motoru se využívá čtyřkvadrantový pulsní měnič. Ovšem pro dosažení vyšší účinnosti systému se používají třífázové asynchronní nebo synchronní motory, které se řídí třífázovým střídačem, na kterém se aplikují nejrůznější moderní metody řízení regulovaných pohonů.[4]

3.1.2 Systém palivový článek – ultrakapacitor – měnič – motor

Následující blokové schéma ukazuje složení pohonného systému, který již nevyužívá měnič s ultrakapacitorovou baterií jako paralelní (sekundární) zdroj, ale je využit jako sériový prvek umístěný mezi palivový článek, výkonový měnič a poháněný motor (obrázek č. 13). [4]

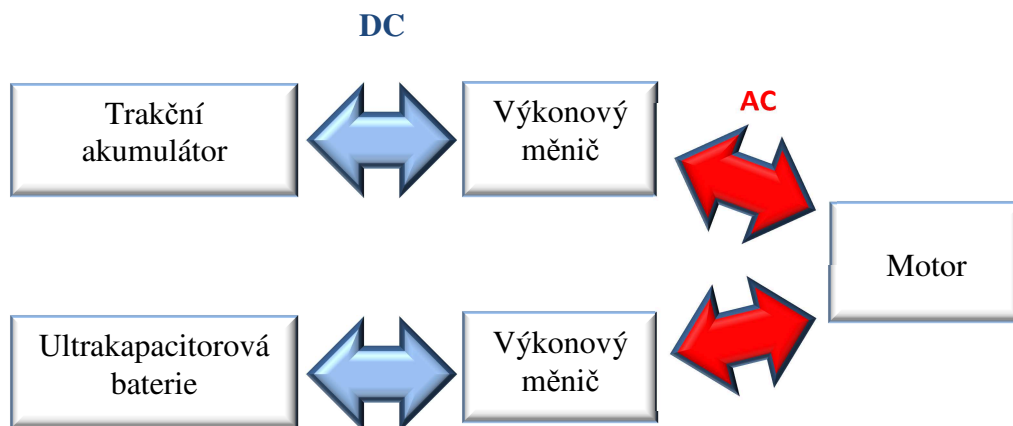


Obr. 13. Blokové uspořádání pohonné jednotky [4]

Tato pohonná jednotka je určena výhradně pro malý elektromobil či elektrický skútr. Palivový článek (Nexa) je v systému určen jako hlavní zdroj s parametry: výstupní stejnosměrné napětí 25-40V a výkon 1kW. Motor v tomto elektromobilu je většinou volen stejnosměrný s komutátorem. Pomocí měniče s ultrakapacitorovou baterií se v systému provádí regulace napěťových a proudových hladin. Ultrakapacitorová baterie v tomto systému plní také akumulaci energie vznikající při rekuperaci brzděné energie, nebo jízdě elektromobilu z kopce. V době počátečního náběhu palivového článku se bere energie z ultrakapacitorové baterie. [4]

3.1.3 Systém akumulátor – měnič – motor, ultrakapacitor – měnič – motor

Tento pohonný systém je určen výhradně pro budoucí elektromobily s výbornou účinností své pohonné jednotky. V pohonném systému je opět využit systém s více zdroji energie (Obrázek č. 14). [4]



Obr. 14. Blokové uspořádání pohonné jednotky [4]

Základním a hlavním rozdílem oproti systému akumulátor – ultrakapacitor – měnič – motor, který je popsán v kapitole 2.2.3, je ve spojení zdrojů energie na střídavé straně napětí, jsou teda spojeny až na trakčním motoru. Hlavní zdroj systému je tvořen LiPePO₄ trakčním akumulátorem, jako podřazený zdroj energie je zvolena ultrakapacitorová baterie. V tomto systému jsou použity nové bloky a to výkonové měniče s vyšší účinností. [4]

3.2 Výhody a nevýhody hybridních elektromobilů

Výhody a nevýhody hybridních elektromobilů jsou obdobné jako v předchozí kapitole 2 elektromobily. Jediným rozdílem je připojení ultrakapacitoru do pohonného systému a proto se zaměříme na výhody a nevýhody ultrakapacitorů v tomto systému.

3.2.1 Výhody ultrakapacitorů

- je možné nabíjet či vybíjet vysokými proudy (oproti trakční baterii)
- ukládání energie probíhá s minimálními ztrátami (oproti trakční baterii)
- má neomezený počet nabíjecích a vybíjecích cyklů

3.2.2 Nevýhody ultrakapacitorů

- oproti trakční baterii má nesrovnatelně malou akumulační energii
- vysoké ceny ultrakapacitorů na jednotku energie
- vysoká hmotnost ultrakapacitoru na jednotku energie

4 SIMULAČNÍ PROGRAM MATLAB

4.1 Matlab

Název vznikl z anglických slov (**matrix laboratory**) v překladu maticová laboratoř (prostředí). V podstatě se jedná o matematický softverový balík, který pro své základní komplexní numerické výpočty používá maticové operace. Nepoužívá se jen pro matematické výpočty, ale také pro modelování, návrh algoritmů, simulace, pro nejrůznější analýzy a prezentace údajů a také k měření a zpracování signálů. Program Matlab nepatří mezi internetové programy, jako jsou například Mathematic nebo Maple. Proto se matematické operace dají provádět až po nainstalování příslušné knihovny. Celý softverový balík lze objednat od firmy The Mathworks, Inc., kde dostaneme celou řadu nejrůznějších knihoven, například the Symbolic Math Toolbox. [5]

4.1.1 Proč se používá

Každý člověk běžně zvládá matematické operace, jako je sčítání, násobení, odečítání atd., ovšem při komplikovanějších matematických operacích je toto řešení daleko pomalejší a pracnější. Zde je vhodné danou matematickou operaci přenechat počítačům, které zvládnou toto řešení operace. Jedním s těchto programů, které všichni znají, je například Excel. Různé výpočetní programy se vybírají podle jejich vhodných výpočetních prostředí. Jedním s dnes nejpoužívanějších výpočetních programů je Matlab. Matlab je vhodný pro rychlou práci s maticemi a komplexními čísly. Po dosažení požadovaných hodnot se dají tyto výsledky libovolným způsobem graficky znázornit. Tento program umožňuje pracovat s daty z různých odvětví lidské činnosti, protože program Matlab má velice širokou škálu předem vytvořených funkcí. K pochopení těchto funkcí je vytvořena v programu nápověda (ovšem pouze v angličtině). Uživatel tohoto programu, který zvládá sestavit nejrůznější algoritmy, dokáže pak pracovat mnohem efektivněji a rozšiřují se mu jeho možnosti působení v programu. [5]

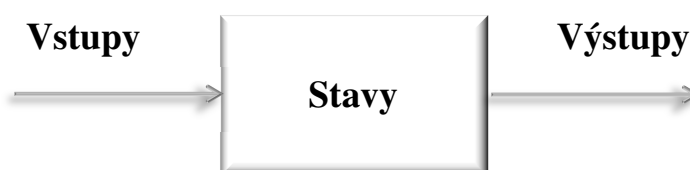
4.2 Simulink

Simulink se většinou definuje jako nadstavba programu Matlab pro modelování a simulace dynamických systémů, které využívají algoritmu programu Matlab pro číselné výpočty nelineárních diferenciálních rovnic. Program Simulink umožňuje uživateli jednoduše a rychle navrhovat modely dynamických soustav ve tvaru blokových schémat a rovnic. Vedle standardních operací dovoluje program Simulink simulovat přesněji a rychleji daleko složitější a rozsáhlejší systémy s efektivním využitím paměti v počítači. V grafickém editoru programu Simulink lze navrhovat modely lineárních, nelineárních, v čase diskrétních, nebo spojitých systémů pomocí jednoduchého způsobu přesouvání funkčních bloků myší. Nejrůznější architektury blokového

schématu lze spouštět i na základě daného výsledku logické podmínky. Proto se tyto programy dobře aplikují v některých náročných simulačních experimentech. Program Simulink má mnoho nejrozličnějších knihoven, kdyby však uživatel nestačil tyto knihovny, může si uživatel díky otevřené architektuře vytvářet vlastní funkční bloky a přidávat je do knihovny programu Simulink. Víceúrovňová struktura blokového schématu umožňuje navrhovat i velice složité blokové schéma do přehledné soustavy podsystemu prakticky bez omezení počtu bloků. Matlab, takže i Simulink dokáže připojovat funkce napsané v programovacím jazyce C. Díky kvalitním grafickým možnostem Simulinku může sloužit i k vytvoření dokumentace. [6]

4.2.1 Popis funkce Simulink

Pro správnou práci v programu Simulink postupujeme vždy podle těchto dvou kroků. Nejdříve si navrhne model v grafickém editoru. Tento model popisuje vztahy mezi vstupy, stavy a výstupy systému (viz obrázek č. 15). Po vytvoření modelu můžeme spustit simulaci. Simulace představuje vlastně použití číslíkového řešiče, který pomocí numerických integrací vypočte aktuální stavy daného systému. Každý model je sestaven z bloků, který obsahuje množinu vstupů, stavů a výstupů. Výstup je tvořen společnou funkcí vstupů a stavů. Funkce ovšem především závisí na typu bloku. Stav tedy představuje proměnnou, která nám mění výstup bloku a její aktuální hodnota je funkcí předešlé hodnoty stavu a vstupu. Blok tedy pracuje jako „paměť“, která ukládá hodnotu stavu, a tyto bloky se stavy bývají označovány jako bloky s pamětí. [7]



Obr. 15. Model systému [7]

Není tomu vždy tak, že blok obsahuje stavy. Takový blok zesílení (Gain) pracuje pouze s vstupním signálem tak, že ho vynásobí konstantou zesílení a výsledek pošle na výstup. Zesílení tudíž neobsahuje žádný vnitřní stav. Tento proces nastává pokaždé, když výstupní hodnota závisí přímo na vstupní. Bloky jako takové obsahují několik funkcí, které ovlivňují vztahy mezi vstupy, stavy a výstupy v závislosti na čase. [7]

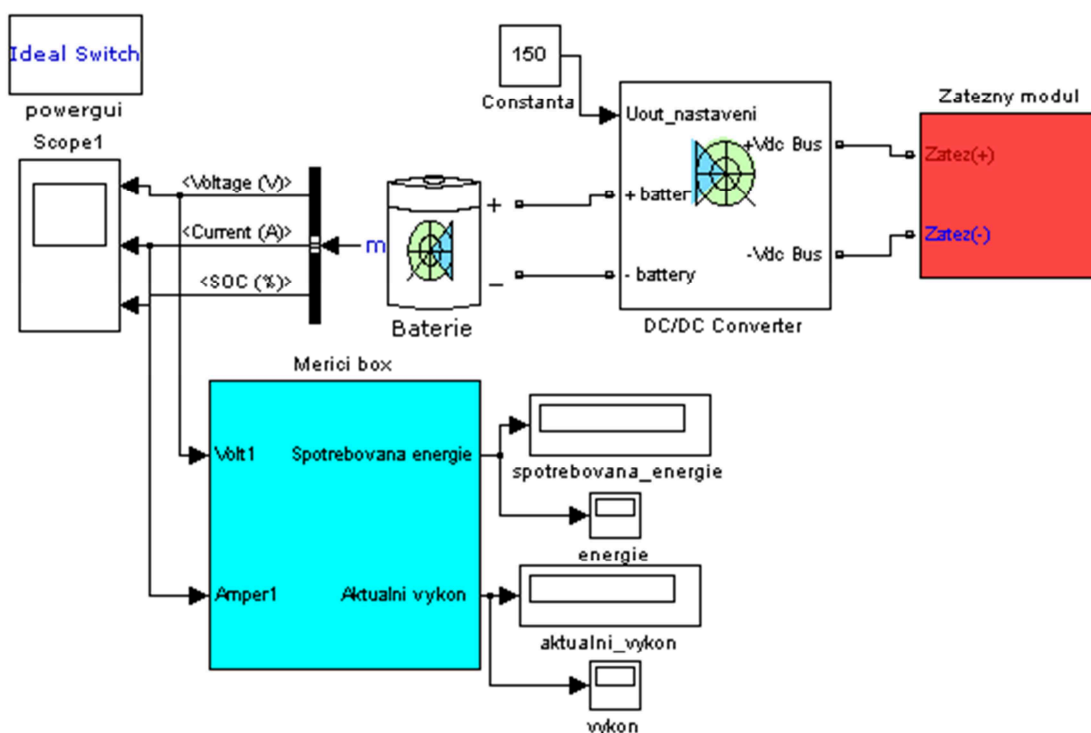
Jsou to:

- výstupní funkce (funkce času, vstupu a stavu)
- derivace (spojité systémy) – vrací derivaci stavů, závisí na čase, vstupu a stavu
- update funkce (diskrétní systémy) – vrací novou hodnotu stavů v závislosti na čase, vstupu a stavu [7]

5 POPIS SIMULAČNÍCH SOUSTAV

5.1 Vytvoření simulačního modelu s jednozdrojovou jednotkou elektromobilu

Modelovaná soustava zobrazuje jednozdrojovou jednotku elektromobilu (obrázek č. 16). Soustava se skládá ze zdroje elektrické energie (baterie), DC/DC měniče, měřicího boxu a ze zátěže, která představuje pohonný model vozidla. Tento model soustavy slouží k zjištění chování jednozdrojové jednotky při akcelarování a brzdění (rekuperaci) modelovaného vozidla.



Obr. 16. Jednozdrojová jednotka elektromobilu

- Prvním blokem soustavy, na který se zaměříme, je **baterie**.

Jak už bylo uvedeno výše, baterie je v této soustavě hlavním zdrojem energie. Chování baterie můžeme sledovat připojením vývodu **m** na baterii k displeji (Scope), kde se zobrazí průběhy proudu, napětí a stavu energie. Abychom zobrazili dané veličiny v samostatných oknech, použijeme blok Bus Selector, který nám veličiny od sebe rozdělí (obrázek č. 16).

Možnosti nastavení baterie zobrazíme dvojitým kliknutím levým tlačítkem myši na blok označený jako **baterie**, zobrazí se tabulka, která má rozčleněnou hlavní nabídku do tří kategorií (obrázek č. 17). V první nabídce parametry (Parameters) volíme:

- Typ baterie, kterou chceme modelovat. V nabídce jsou možnosti typů baterií Lead – Acid, Lithium – Ion, Nickel – Cadmium, Nickel – Metal – hydride.

Pro simulační soustavu se nejlépe hodí baterie typu Nickel – Metal – hydride.

Hlavními složkami Ni-MH jsou:

- kladná elektroda na bázi sloučenin niklu
- záporná elektroda s M pohlcující vodík,
- elektrolyt, jímž je zředěný roztok hydroxidu a
- separace

Ni označuje nikl, M označuje slitinu a MH hydroxid kovu. [8]

Jmenovitým napětím (V) nastavujeme jmenovitou hodnotu napětí baterie. Jmenovitou kapacitou (Ah) nastavujeme jmenovitou hodnotu kapacity baterie. Počáteční stav nabití (%) nastavujeme počáteční hodnotou hladiny nabití, a to v rozhraní 0% - což představuje nulovou hladinu (vybití) a 100% - což představuje plné nabití baterie.

Abychom dospěli k přesně definovaným parametrům podle vybíjecích charakteristik, je nutné zaškrtnout bod (Use parameters based on Battery type and nominal values), což v překladu znamená „užít parametry podle typu baterie a jmenovitých hodnot“. Další parametry v tabulce jsou - maximální kapacita (Ah), napětí plně nabitého článku (V), jmenovitý vybíjecí proud (A), vnitřní odpor baterie (Ω), kapacita při jmenovitém napětí (Ah), exponenciální zóna [napětí (V), kapacita (Ah)].

Block Parameters: Batterie

Battery (mask) (link)

Implements a generic battery that model most popular battery types. Uncheck the "Use parameters based on Battery type and nominal values" parameter to edit the discharge characteristics.

Parameters View Discharge Characteristics Battery Dynamics

Battery type Nickel-Metal-Hydride

Nominal Voltage (V) 100

Rated Capacity (Ah) 100

Initial State-Of-Charge (%) 100

☒ Use parameters based on Battery type and nominal values

Maximum Capacity (Ah) 107.6923

Fully Charged Voltage (V) 117.7966

Nominal Discharge Current (A) 20

Internal Resistance (Ohms) 0.01

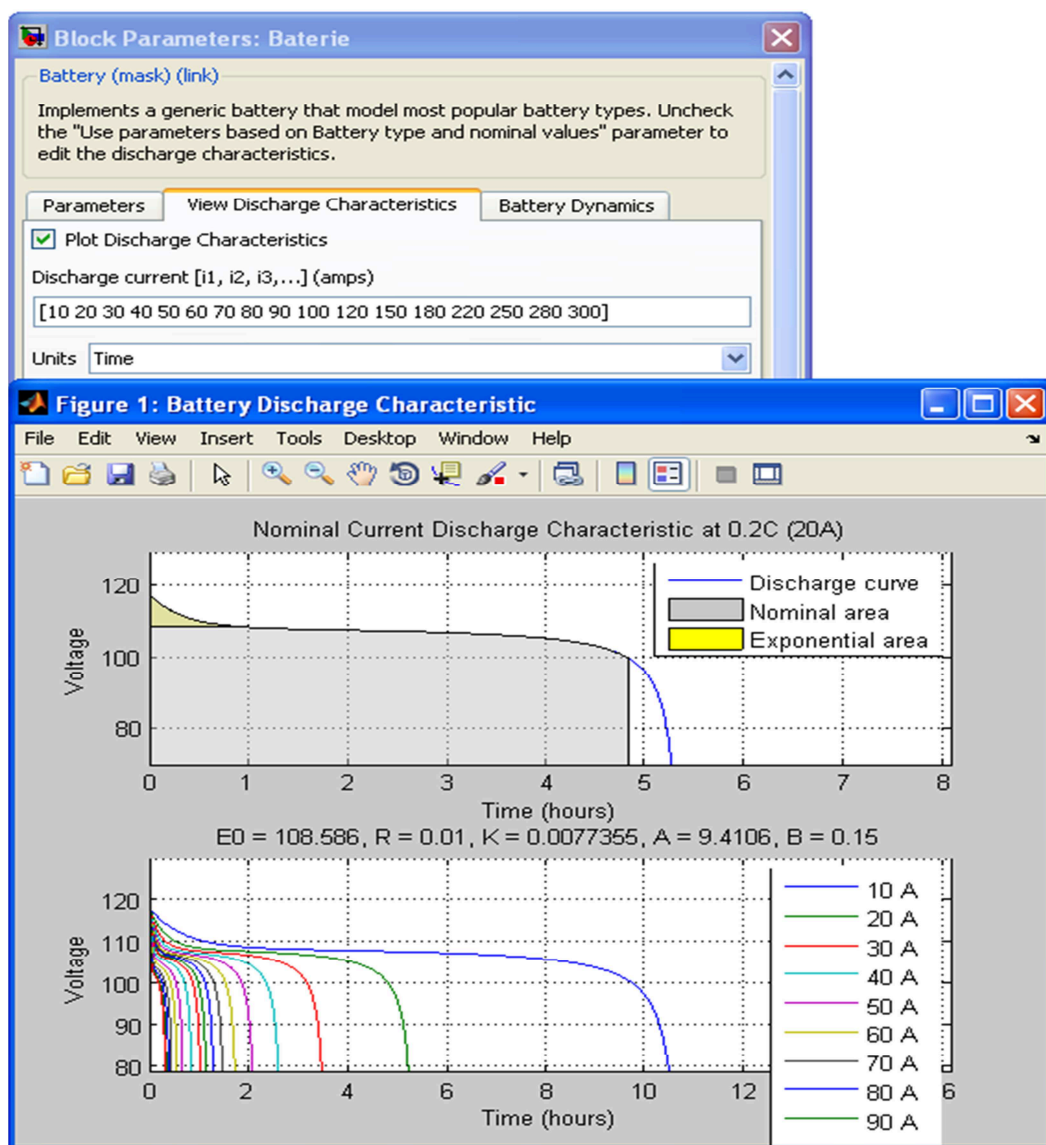
Capacity (Ah) @ Nominal Voltage 96.1538

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)] [108.4746, 20]

OK Cancel Help Apply

Obr. 17 Hlavní tři kategorie se zobrazenou nabídkou parametrů

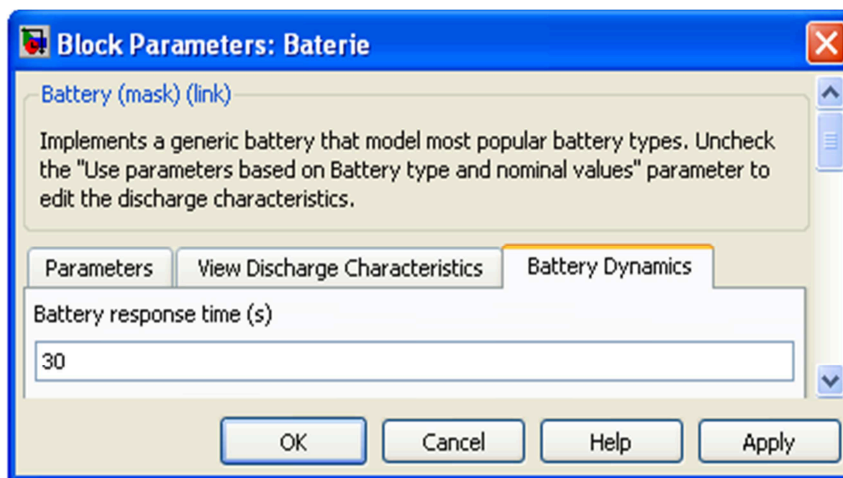
V druhé kategorii (View Discharge Characteristics) „zobrazení vybíjecích charakteristik“ si můžeme ověřit správnost nadefinovaných vlastností baterie (obrázek č. 18 nahoře).



Obr. 18. Nabídka vybíjecích charakteristik

Zaškrtnutím bodu (Plot Discharge Characteristics) „vykreslit vybíjecí charakteristiky“ se zobrazí okno s dvěma grafy automaticky (obrázek č. 18 dole). Kdyby k tomu nedošlo, stiskneme tlačítko (Apply) „použít“. Na horním grafu vidíme vybíjecí charakteristiku při jmenovitém vybíjecím proudu. Na spodním grafu vidíme charakteristiky podle zvolených proudů v kolonce (Discharge Current) „vybíjecí proud“. Dále můžeme zvolit (Units) „jednotku“ na x ose grafu. Volíme mezi jednotkami času (Time) v „hodinách“ nebo (Ampere-hour) „Ampérhodinách“.

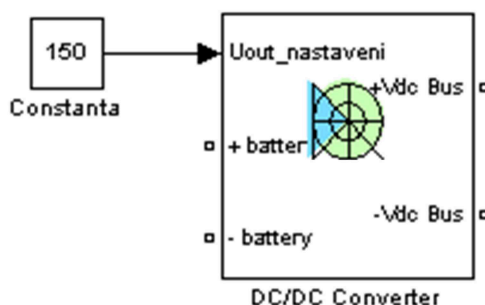
Ve třetí kategorii (Battery Dynamics) „dynamika baterie“, je nastavována časová odezva baterie (obrázek č. 19).



Obr. 19. Třetí nabídka dynamika baterie

Po tomto nastavení parametrů baterie klikneme v pravém dolním rohu tabulky na tlačítko (Apply) „použít“ a pro uzavření okna klikneme na tlačítko OK.

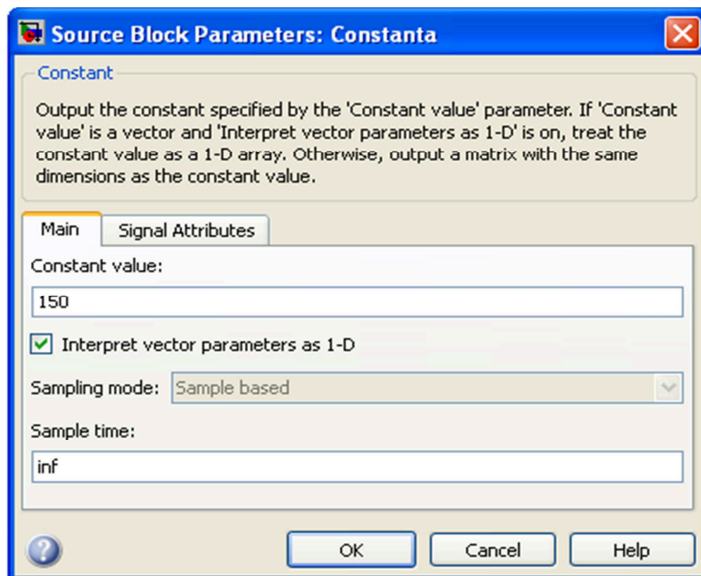
- Dalším blokem soustavy je **DC/DC (Converter)** „měnič“ (obrázek č. 20).



Obr. 20. DC/DC měnič

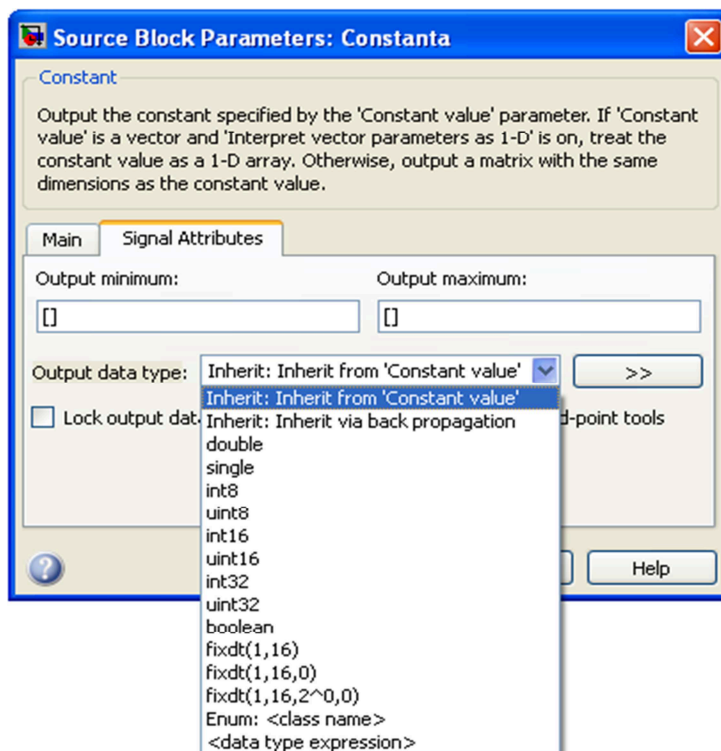
V soustavě slouží pro převod stejnosměrné elektrické energie zdrojových hodnot na stejnosměrnou elektrickou energii požadovaných hodnot. Stejnosměrný měnič neboli pulsní měnič může pracovat v obou směrech průchodu proudu v takzvaném motorickém, nebo generátorickém režimu. Na levé straně měniče se nachází blok „Constanta“. Tento blok zde slouží pro nastavení výstupního napětí z pulsního měniče. Při dvojkliku myši na tento blok se zobrazí tabulka „nastavení parametrů konstanty“, kde vybírám ze dvou kategorií (Obrázek č. 21).

V první kategorii (Main) „hlavní“ nastavujeme hodnotou konstanty požadovanou hodnotu napětí.



Obr. 21. První kategorie Main

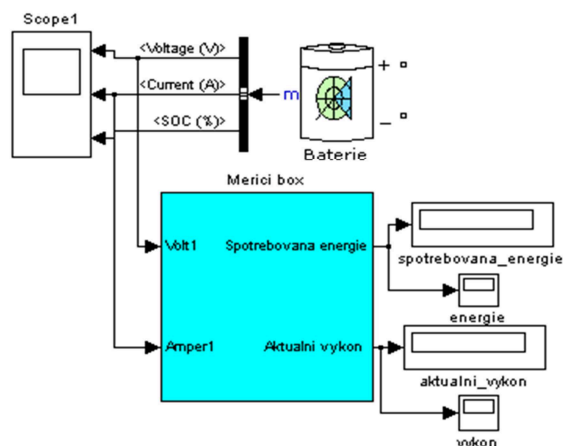
V druhé kategorii (Signál Attributes) „přiřazení signálu“ můžeme nastavit minimální a maximální hodnoty výstupu (obrázek č. 22). Dále můžeme z výběru (Output data type) „výstupní data“ nastavit daný typ výstupních dat.



Obr. 22. Zobrazení druhé kategorie „přiřazení signálu“

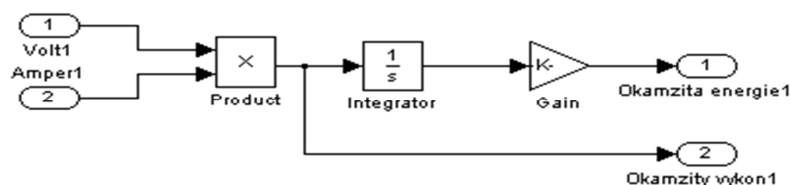
- Třetím blokem soustavy je **měřicí box** (obrázek č. 23)

Měřicí box pomocí napětí a proudu vyhodnocovaného z baterie zobrazuje spotřebovanou energii a aktuální výkon.



Obr. 23. Měřicí box

Dvojklikem levým tlačítkem myši na blok měřicí box se otevře okno, ve kterém jsou vloženy bloky pro tyto výpočty (obrázek č. 24).



Obr. 24. Zobrazení vypočetních bloků

Spotřebovaná energie

$$W = \int P \cdot t$$

[Wh, W, h]

5.1

Aktuální výkon

$$P = U \cdot I$$

[W, U, A]

5.2

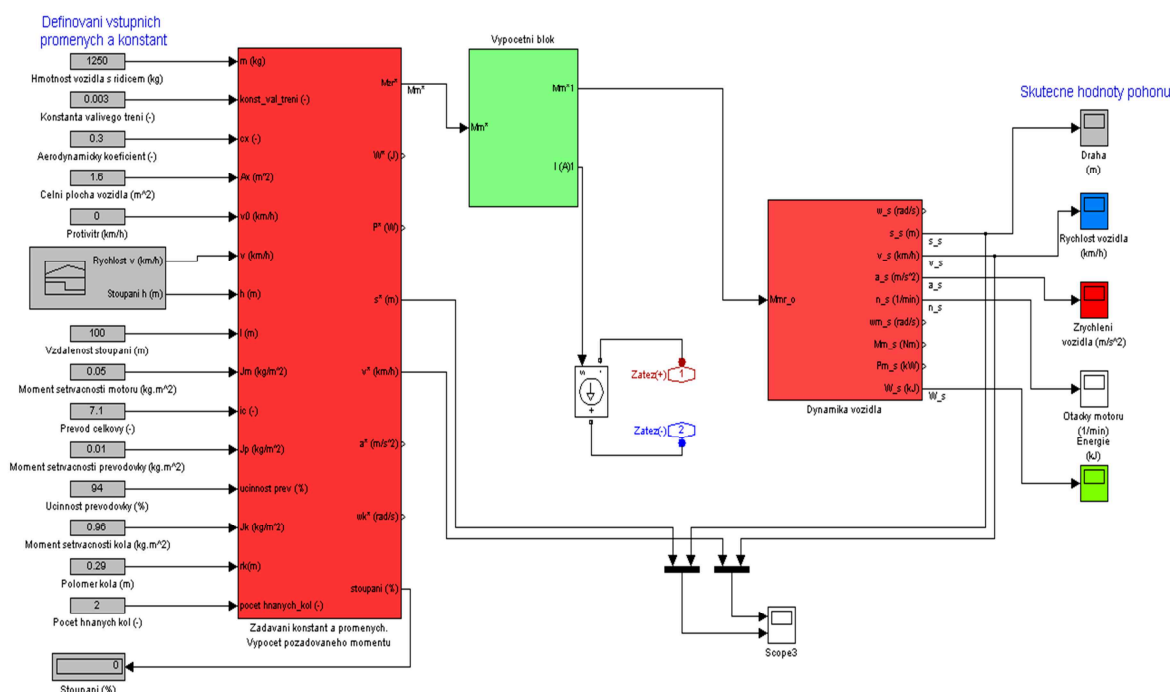
- Posledním blokem soustavy je **zátěžný modul** (obrázek č. 25)

Zátěžný modul představuje reálnou zátěž vozidla. Dvojklikem levým tlačítkem myši na ten to blok se zobrazí modelová struktura vozidla (obrázek č. 26). Tento blok v sobě uchovává tři další podbloky.



Obr. 25. Zátěžný modul

Tyto podbloky jsou - výpočet odporových sil a požadovaného momentu, přepočet momentu na proud, dynamika vozidla. Obsah bloku, výpočet odporových sil a požadovaného momentu zobrazíme dvojklikem levým tlačítkem myši na tento blok.



Obr. 26. Vnitřní struktura zátěžného modulu

Do tohoto bloku vstupují šedá pole s názvem „Constant“ kde se zadávají hodnoty jednotlivých proměnných a konstant (obrázek č. 26). V šedém bloku Signal Builder „nastavitelný signál“ lze nastavit požadovaný průběh rychlosti a jízdního profilu vozidla. Po nadefinování jednotlivých hodnot do polí Constant, blok vypočte požadované hnací síly F_h neboli stanoví potřebný moment motoru (červený blok vlevo na obrázku č. 27). Síla F_h je vypočtena pomocí rovnice odporových sil při pohybu vozidla.

$$F_h = F_{ovt} + F_{oa} + F_{os} + F_{oz} \quad [N, N, N, N, N] \quad 5.3$$

kde

F_{ovt} – odpor valivého tření

$$F_{ovt} = Z_k \xi = G \cos(\alpha) \xi = mg \xi \sqrt{1 - s^2} \quad [N, kg, m.s^{-2}, -, -] \quad 5.4$$

F_{oa} – odpor aerodynamický

$$F_{oa} = \frac{1}{2} \rho c_x A_x (v + v_0)^2 \quad [N, kg.m^{-3}, -, m^2, m.s^{-1}] \quad 5.5$$

F_{os} – odpor stoupání

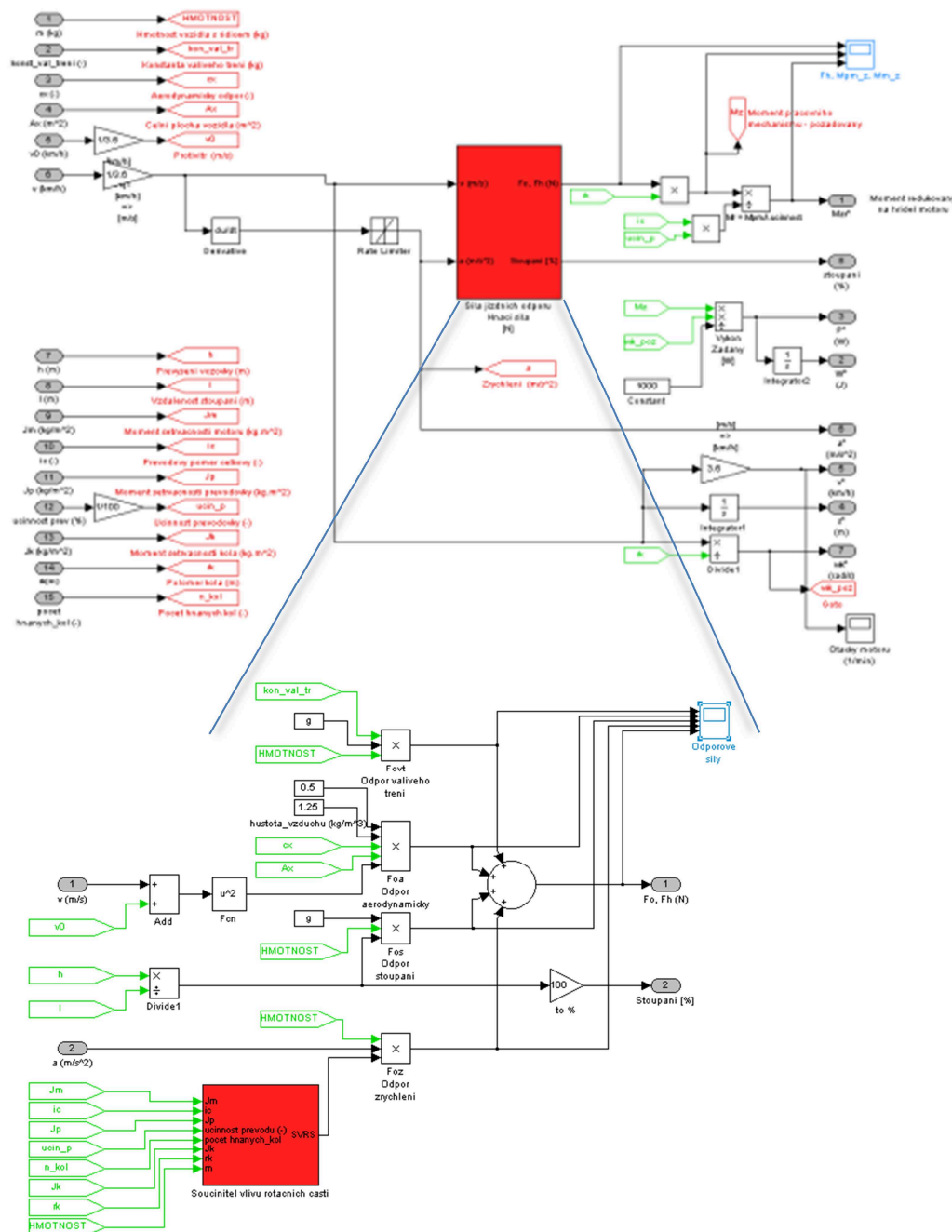
$$F_{os} = \pm G \sin(\alpha) \quad [N, N, rad] \quad 5.6$$

F_{oz} – odpor zrychlení

$$F_{oz} = F_{zpos} + F_{zrot} = \left(m + \sum_i \frac{J_{ki}}{r_{dirki}} \right) a$$

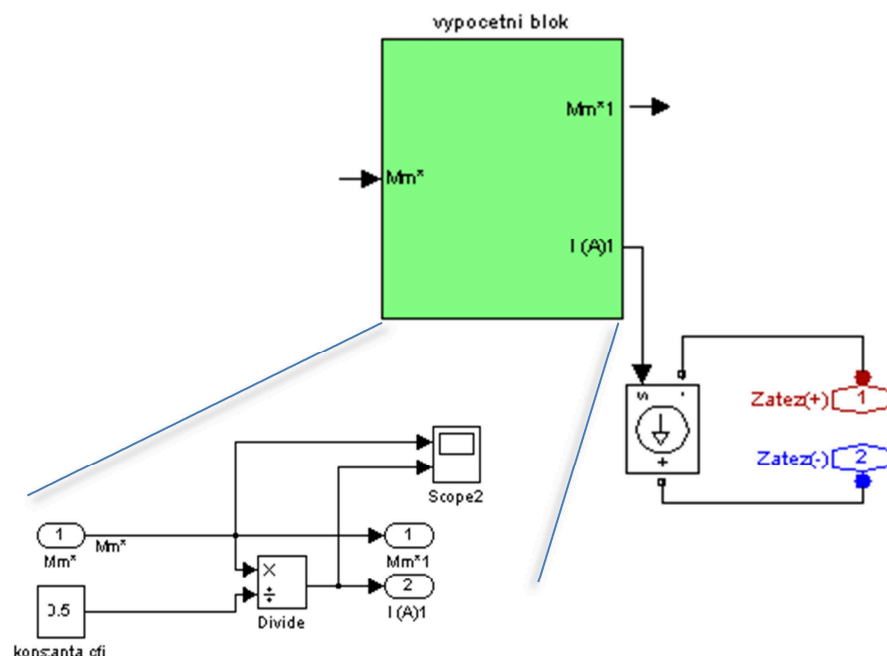
[N, kg, kg.m², m, m, m.s⁻²] 5.7

Ostatní bloky umístěné v tomto systému slouží k převodům a přepočtům žádaných hodnot energie, výkonu, rychlosti, zrychlení, dráhy, úhlové rychlosti a hlavně pro soustavu nejdůležitější parametr moment na hřídeli motoru.



Obr. 27. Vnitřní struktura bloku „výpočet odporových sil a požadovaného momentu“ a zobrazení podbloku „výpočtu síly jízdního odporu F_h “

Tento moment na hřídeli motoru vstupuje do výpočetního bloku (obrázek č. 28). V tomto bloku se z vypočteného momentu na hřídeli motoru vypočte požadovaný proud odpovídající tomuto momentu. Požadovaný proud vycházející z výpočetního bloku pak redukuje proud do proudové zátěže pro jednozdrojovou jednotku elektromobilu.



Obr. 28. Výpočetní blok a vnitřní struktura

Jako zátěž uvažujeme stejnosměrný motor, proto můžeme vyjádřit požadovaný proud tímto zjednodušeným vztahem.

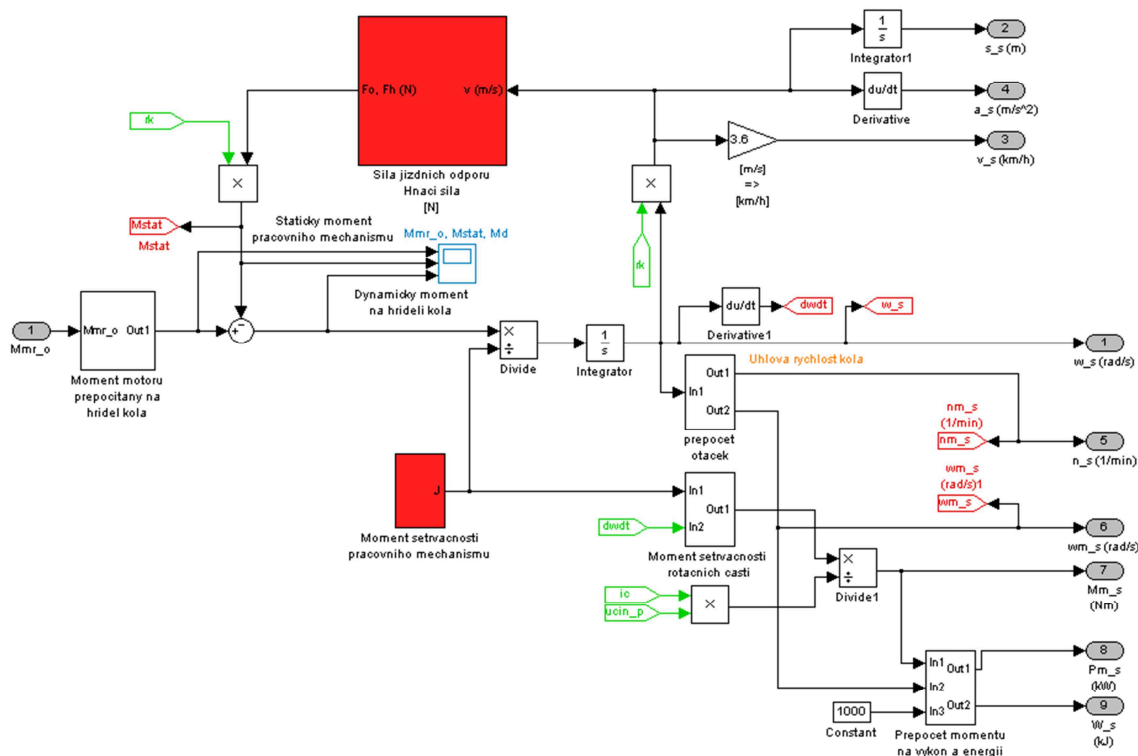
Požadovaný proud se vypočte ze vztahu

$$I = \frac{Mm^*}{c\phi} \quad [A, Nm, Vs] \quad 5.8$$

Druhou veličinou vycházející z výpočetního bloku je nezměněný moment na hřídeli motoru. Tento moment vstupuje do následujícího bloku dynamika vozidla.

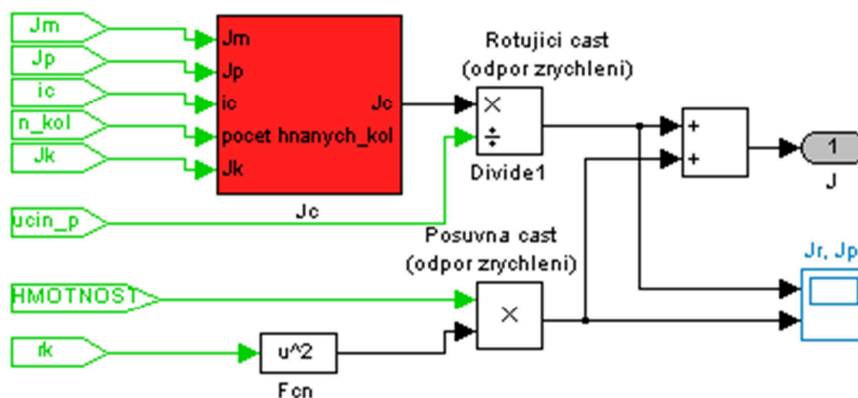
Blok dynamiky vozidla slouží pro namodelování pohybu vozidla (obrázek č. 29). Jak už bylo zmíněno výše, do bloku vstupuje vypočtený moment na hřídeli motoru a také jsou do bloku přiváděny konstanty charakterizující trakční mechanismus. Tyto konstanty jsou hmotnost vozidla, konstanta valivého tření, aerodynamický koeficient, čelní plocha vozidla, protivítr, vzdálenost stoupání, moment setrvačnosti motoru, celkový převod, moment setrvačnosti převodovky, účinnost převodovky, moment setrvačnosti kola, poloměr kola, počet hnacích kol. Všechny tyto konstanty

jsou předvoleny v šedých polích bloku, výpočet odporových sil a požadovaného momentu (obrázek č. 26). Z těchto zvolených a vypočtených parametrů vypočítáme uhlovou rychlost kola.



Obr. 29. Vnitřní struktura bloku dynamika vozidla

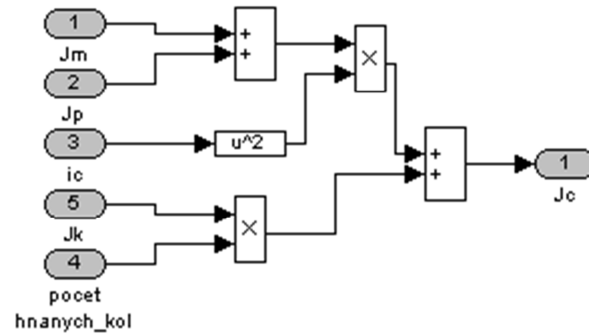
Z této uhlové rychlosti kola, přepočteme přes poloměr kola skutečnou dráhu, rychlost, a zrychlení vozidla a statické odpory.



Obr. 30. Vnitřní struktura bloku „Moment setrvačnosti pracovního mechanismu“

Statické odpory jsou vypočteny v červeném bloku „hnací síla“, který obsahuje obdobnou vnitřní strukturu, jak tomu bylo v předchozí kapitole „výpočet odporových sil a požadovaného momentu“. Druhým červeným blokem označeným písmenem J je moment setrvačnosti pracovního mechanismu, pomocí kterého je vypočítán skutečný moment motoru (obrázek č. 30).

Z těchto parametrů (moment motoru, úhlová rychlost kola) jsou vypočteny skutečné hodnoty pohonu – energie, výkon, otáčky a úhlová rychlost motoru.



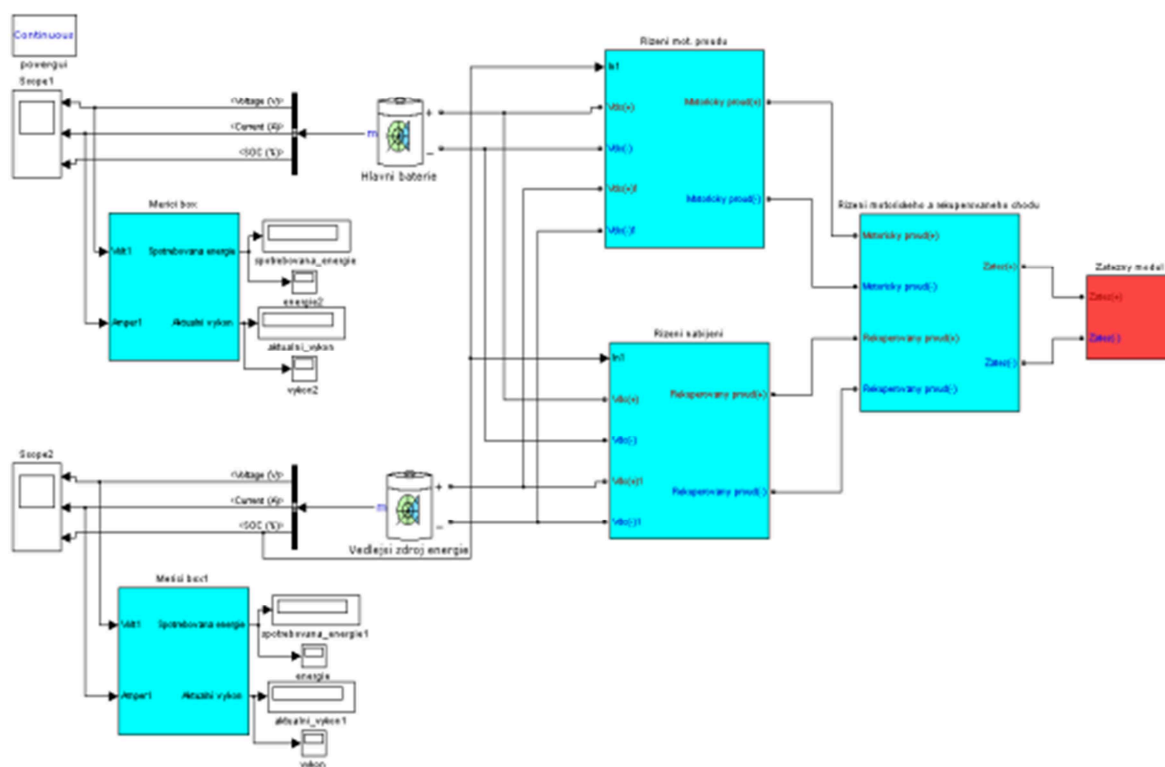
Obr. 31. Vnitřní struktura podbloku J_c momentu setrvačnosti

Podblok J_c (obrázek č. 16) se vypočte podle vztahu:

$$J_c = J_k \cdot H_{kol} \cdot i_c^2 \cdot (J_m + J_p) \quad [\text{kg/m}^2, \text{kg/m}^2, -, -, \text{kg/m}^2, \text{kg/m}^2] \quad 5.9$$

5.2 Vytvoření simulačního modelu s vícezdrojovou jednotkou elektromobilu

Modelovaná soustava zobrazuje vícezdrojovou (hybridní) jednotku elektromobilu (obrázek č. 32). Soustava se skládá ze dvou zdrojů elektrické energie (dvou baterií), měřících boxů, dále z boxu pro řízení motorického proudu, boxu pro řízení motorického a rekuperačního chodu, boxu pro řízení nabíjení a ze zátěže, kterou nám představuje pohonný model vozidla. Tento model vícezdrojové soustavy se opět snaží přiblížit k chování skutečného chodu při akcelarování a rekuperaci (brždění) modelovaného vozidla.



Obr. 32. Vícezdrojová jednotka elektromobilu

Dříve, než začnu popisovat podrobně namodelovanou soustavu (obrázek č. 32), pozastavím se nad možnostmi nabíjení vedlejšího (pomocného) zdroje energie. Existuje celá řada možností, jakými způsoby a při jakých podmínkách provádět toto nabíjení.

Bod 1. Nabíjení vedlejšího (pomocného) zdroje energie

Nabíjení vedlejšího zdroj energie vede k zamyšlení, odkud získat požadovanou energii, která by dostačovala k tomuto zpětnému obnovení elektrické energie. Existuje několik způsobů k získání takovéto energie, například umístění solárních panelů na vozidlo. Práce byla zaměřena na získávání této energie ze „zmařené“ produkované energie, která vzniká ve vozidle.

Bod 2. Úroveň nabíjení vedlejšího (pomocného) zdroje energie

Další otázkou na zamyšlení je úroveň nabití vedlejšího zdroje energie. Zvolit do jaké úrovně nabíjet není ovšem tak jednoduché, protože závisí na mnoha faktorech, např. zvolená trasa vozidla, výkon motoru vozidla, kapacita zvoleného vedlejšího zdroje energie, typ vozidla (velikost, hmotnost atd.) a také způsob užití vozidla (osobní automobil, autobus či nákladní automobil). S těmito faktory se musí počítat při každém podobném návrhu.

Bod 3. Popis několika možností nabíjení vedlejšího (pomocného) zdroje energie

Jako základní dvě možnosti nabíjení ze zvolené soustavy jsou:

1. rekuperace
2. nabíjení z hlavní baterie

Nabíjení pomocí rekuperace je dáno zvolenou trasou. Nabíjení probíhá v daných podmínkách, které my až tak nemůžeme ovlivnit (jízda z kopce, motorické brzdění vozidla).

Ovšem nabíjení vedlejšího zdroje energie pomocí hlavního zdroje energie, to je situace, kterou musíme zhodnotit a určit za jakých podmínek by bylo vhodné takto vedlejší zdroj dobíjet.

- Uvedení několika možností nabíjení z hlavní baterie:
 - a) při rekuperaci
 - b) při nízkém odběru z hlavní baterie
 - c) při nulovém odběru z hlavní baterie
 - d) při vybíjení hlavní baterie
 - e) nenabíjet vůbec
- Jednoduše si popíšeme tyto stavy nabíjení:
 - a) při rekuperaci

Mohl by nastat případ, že vedlejší zdroj energie se plně nabije, to ovšem závisí opět na zvolené úrovni popsané v bodu 2. Pravděpodobnější variantou je, že se zamezí vybití vedlejšího zdroje energie. Při jízdě vozidla ve městě by nabíjení pracovalo například při zastavování na křižovatkách. V tomto případě by pracovalo nabíjení správně a zamezilo by úplnému vybití vedlejšího zdroje energie. Ovšem při jízdě vozidla s dlouhého kopce dolů (např. na horách) by došlo k plnému nabití vedlejšího zdroje energie. Možné řešení je omezit nabíjecí proud v závislosti na velikosti rekuperovaného proudu, spotřebovat rekuperovanou energii jinak např. použitím brzděného odporu (chopper, na kterém se přebytečná elektrická energie spotřebovává) nebo odpojit motor z obvodu.

- b) při nízkém odběru z hlavní baterie

Například si tuto situaci můžeme přestavit při dlouhé jízdě vozidla po dálnici. Opět by mohlo

nastat plné nabití vedlejšího zdroje energie a při následující velké rekuperaci by docházelo k vzniku velkého rekuperačního proudu, který není vhodný pro nabití hlavní baterie. Možné řešení by opět bylo ve stanovení maximální úrovně nabití vedlejšího zdroje energie z hlavní baterie. Tato úroveň nabití, ale opět závisí na faktorech popsaných výše v bodu 2.

c) při nulovém odběru z hlavní baterie

Tuto situaci si můžeme představit například ve chvíli, kdy vozidlo zastaví a stojí. Může docházet ke stejné situaci jako v předešlé kapitole 2.2. Ale pravděpodobněji by se zamezilo úplnému vybití vedlejšího zdroje energie, musíme však opět brát v úvahu faktory z bodu 2.

d) při vybíjení hlavní baterie

V této variantě by docházelo k velkému odběru energie z hlavní baterie, což není pro danou soustavu ani pro hlavní baterii vhodné (nedoporučuje se).

e) nenabíjet vůbec

Alternativním řešením může nastat i tato varianta - ponechání celkového dobíjení pouze na rekuperované energii. Pravděpodobně však nastane případ, že rekuperace bude menší než vybíjení.

Zde jsem poukázal na pár možností nabíjení vedlejšího zdroje energie. Je to asi jen zlomek možností, kdy by se dal vedlejší zdroj energie dobíjet. Nejvhodnější variantou by bylo kombinování nejrozumnějších možností dobíjecích logik. Ovšem tato kombinace logického systému dobíjení závisí opět na řadě faktorů, na které se nesmí zapomenout. Proto je vhodné kombinovat logiku dobíjení pro každý druh vozidla samostatně (více bod 2).

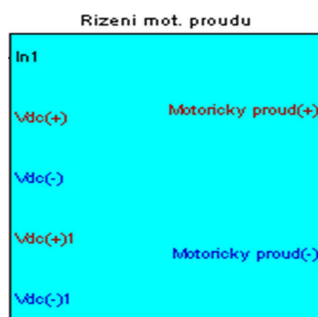
V namodelované soustavě jsem zakomponoval oba hlavní způsoby nabíjení, jak rekuperační tak nabíjení z hlavní baterie. V nabíjení z hlavní baterie jsem z řady možností využil nabíjení při rekuperaci, bod 2.1 popsaný výše, který vypadá jako nejlepší řešení.

- **Popis soustavy**

Prvním blokem soustavy, kterým bychom měli začít, je baterie. Tento blok již je popsán v předešlé kapitole (Vytvoření simulačního modelu s jednozdrojovou jednotkou elektromobilu) stejně tak, jako měřicí boxy a zátěž. Tedy v této kapitole jsou popsány bloky, které přibýly v soustavě. Tyto bloky jsou box pro řízení motorického proudu, box pro řízení motorického a rekuperačního chodu a box pro řízení nabíjení.

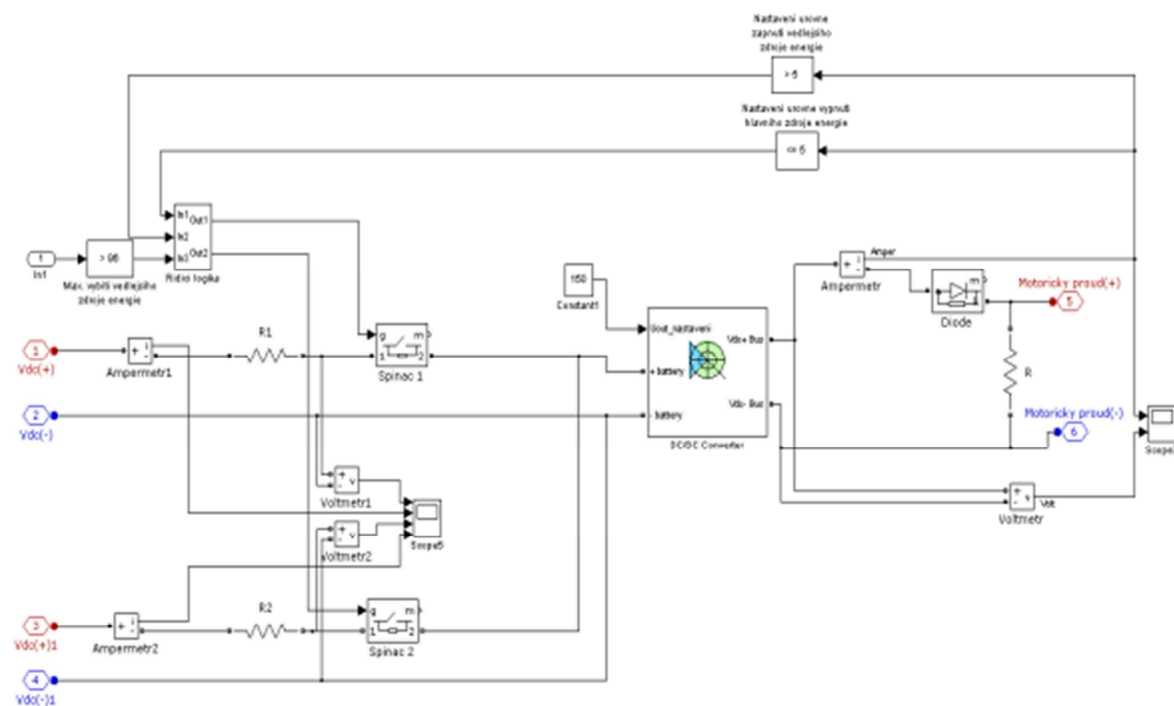
- První blok, na který se zaměříme, je **box pro řízení motorického proudu** (obrázek č. 33).

Na tomto bloku je zobrazeno pět vstupů a dva výstupy. Vstup In1 přivádí do bloku signál o stavu nabití (energie) z vedlejšího zdroje energie. Ke vstupům Vdc(+) a Vdc(-) je připojena hlavní baterie a ke vstupům Vdc(+)1 a Vdc(-)1 je připojen vedlejší zdroj energie.



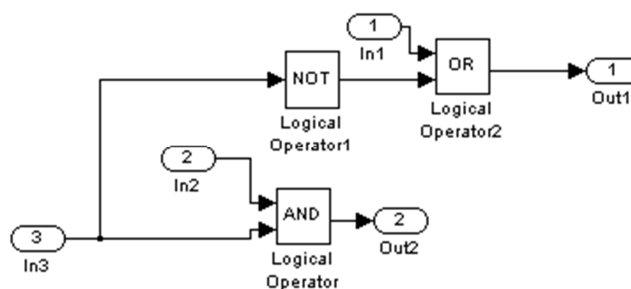
Obr. 33. Box pro řízení motorického proudu

Z výstupu motorický proud + a – už jde paralelní kombinace obou zdrojů energie dohromady. Tato společná energie vstupuje do DC/DC měniče, který ji převádí na požadovanou hodnotu proudu a napětí. O DC/DC měniči více v předešlé kapitole 5.1. Po dvojkliku pomocí levého tlačítka myši na blok řízení motorického proudu se zobrazí okno s vnitřní strukturou (obrázek č. 34). Vnitřní struktura zobrazuje logiku pro řízení spouštění hlavního a vedlejšího zdroje energie. V logické struktuře jsou tři logické bloky pro nastavení. Prvním blokem umístěným vlevo nahoře se nastavuje maximální dovolená hodnota vybití (v procentech) vedlejšího zdroje energie.



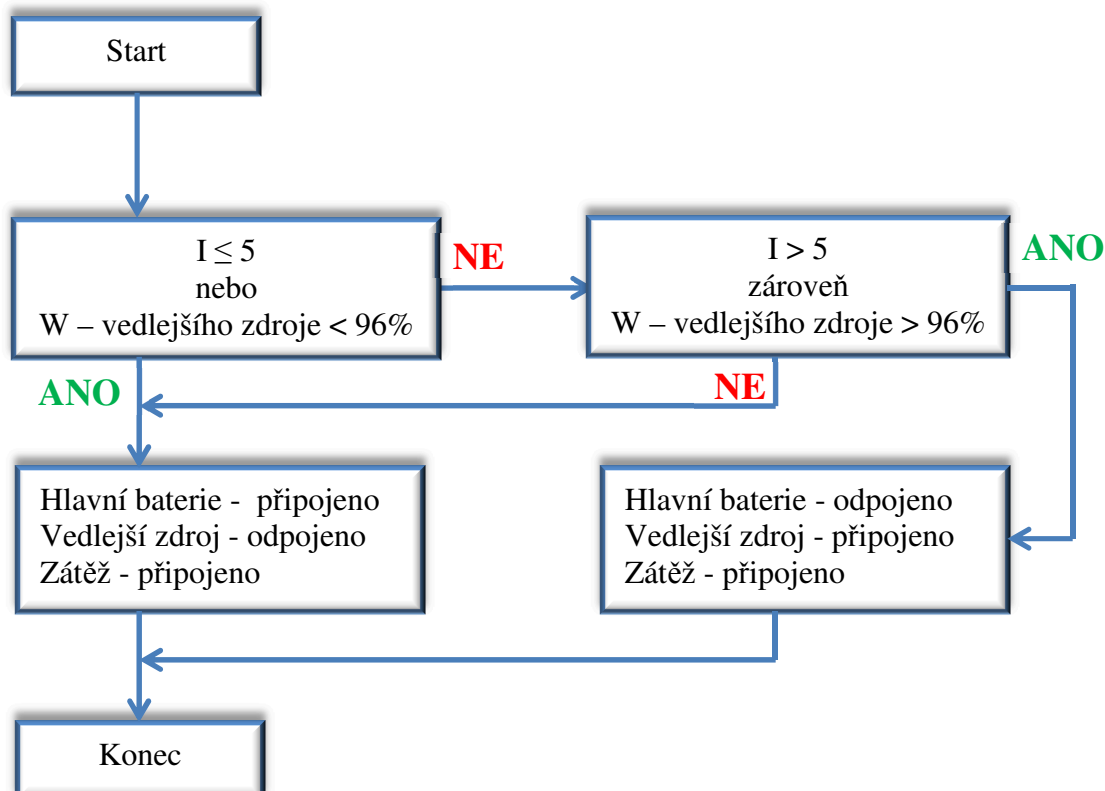
Obr. 34. Vnitřní struktura boxu pro řízení motorického proudu

Druhým a třetím blokem, které jsou umístěny pod sebou, nahoře vpravo, se v horním nastavuje hodnota zapnutí vedlejšího zdroje energie a v dolním hodnota vypnutí hlavní baterie v ampérech. Nejvhodnější způsob nastavení druhého a třetího bloku je tak, aby jejich hodnota byla totožná. V bloku řídicí logika jsou umístěny logické členy, které ovládají spínače jedna a dvě (obrázek č. 35). Spínač jedna odpojuje a připojuje hlavní baterii a spínač dvě odpojuje a připojuje vedlejší zdroj energie. Ve vývojovém diagramu vidíme logickou soustavu bloku řízení motorického proudu (obrázek č. 36). Blok řídicí logiky zajišťuje, když proud zátěže bude menší nebo roven pěti



Obr. 35. Vnitřní struktura podbloku řídicí logiky

ampérům - (nastavitelná hodnota), nebo energie ve vedleším zdroji energie bude menší než devadesát šest procent - (nastavitelná hodnota), bude sepnutý spínač jedna a spínač dvě bude rozpojen a veškerá potřebná energie bude odebírána z hlavního zdroje. Ovšem pokud proud zátěže bude větší než pět ampérů (nastavitelná hodnota), což představuje v soustavě proudovou špičku a



Obr. 36. Vývojový diagram bloku řízení motorického proudu

zároveň energie vedlejšího zdroje bude vyšší než devadesát šest procent (nastavitelná hodnota), bude sepnutý spínač dvě a spínač jedna rozpojen. Tedy v tomto případě je potřebná energie dodávána z vedlejšího zdroje energie a hlavní baterie je odpojena.

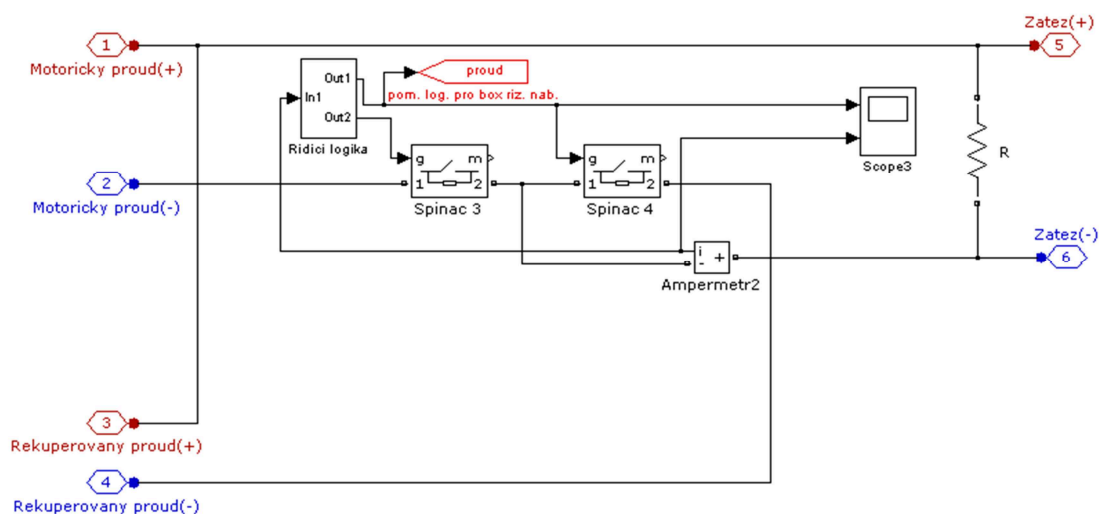
- Další v soustavě je **box pro řízení motorického a rekuperačního chodu** (obrázek č. 37).

Na tomto bloku vidíme dva vstupy a čtyři výstupy. Na dvojici vstupů motorický proud + a – je přiveden z předešlého bloku řízení motorický proud. Dvojice výstupů s názvem zátěž jsou určeny pro připojení zátěže a dvojice výstupů s názvem rekuperovaný proud + a – slouží pro zpětné nabíjení vedlejšího zdroje energie, případně i hlavní baterie.



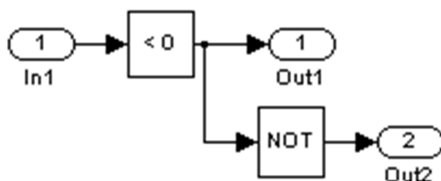
Obr. 37. Box pro řízení motorického a rekuperovaného chodu

Při dvojkliku pomocí levého tlačítka myši na tento blok (řízení motorického a rekuperovaného chodu) se zobrazí okno s vnitřní logikou ovládání bloku (obrázek č. 38). Vyobrazení logiky vidíme ve vývojovém diagramu (obrázek č. 40). V zobrazeném okně vidíme dvojici spínačů tři a čtyři, kde spínač tři slouží pro připojení nebo odpojení motorického chodu a spínač čtyři slouží pro připojení nebo odpojení rekuperačního chodu (obrázek č. 38).



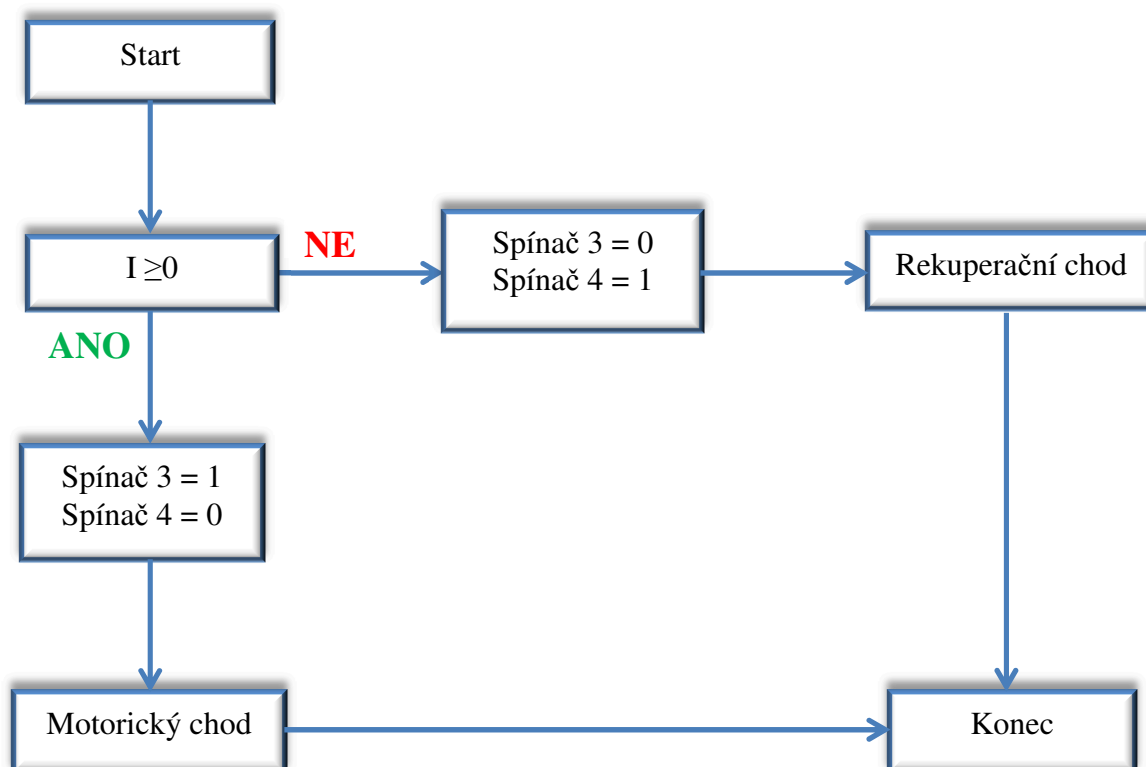
Obr. 38. Vnitřní struktura boxu pro řízení motorického a rekuperačního chodu

Logika přepínání těchto spínačů je uložena v podbloku s názvem řídicí logika. Pro zobrazení vnitřní struktury bloku řídicí logika se musí opět pomocí levého tlačítka myši dvojklikem rozbalit (obrázek č. 39). V podbloku řídicí logika jsou opět vloženy logické členy.



Obr. 39. Vnitřní struktura podbloku řídicí logika

Logika je postavena na měření zátěžného proudu a tím zjišťováním jeho kladné či záporné hodnoty, kdy při kladném proudu (motorický chod) vstupuje energie do zátěže a při záporném proudu (rekuperační chod) vystupuje energie ze zátěže. Pomocí této logiky přepínají spínače tři a čtyři.



Obr. 40. Vývojový diagram bloku řízení motorického a rekuperačního chodu

- Posledním blokem soustavy je **box pro řízení nabíjení** (obrázek č. 41).

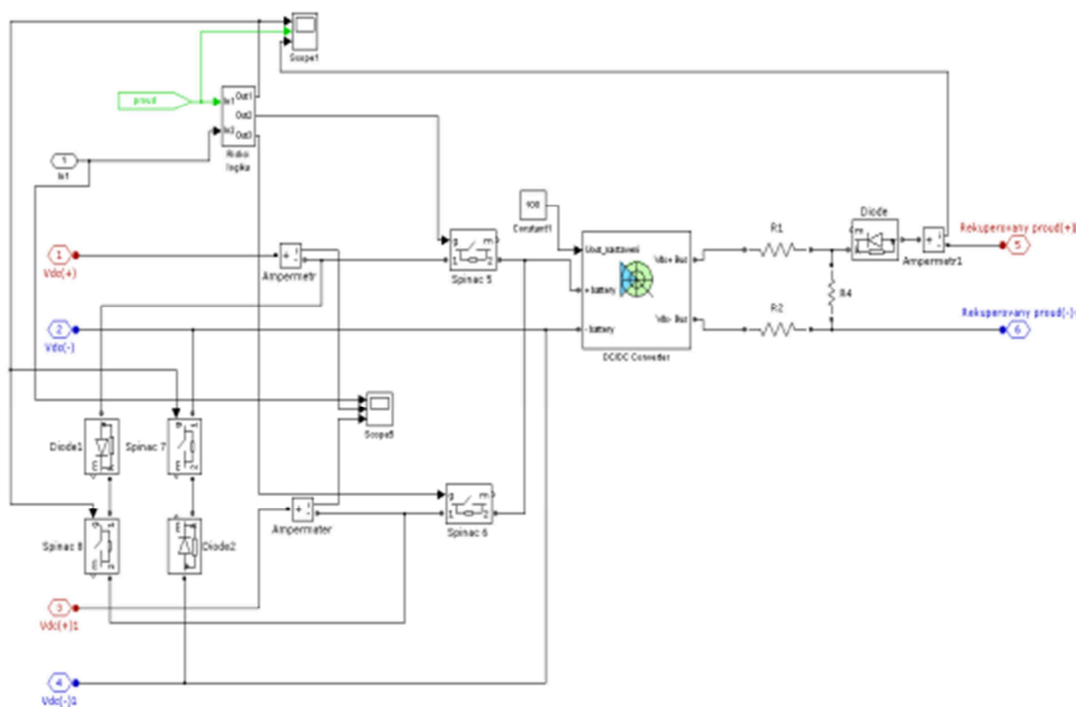
Na bloku můžeme najít tři vstupy a čtyři výstupy. Vstup In1 přivádí do bloku hodnotu udávající stav energie z vedlejšího zdroje. Další dvojice vstupu s názvem rekuperovaný proud + a – slouží pro připojení rekuperovaného proudu z předchozího popisovaného bloku.

Dvojice vývodů Vdc(+) a Vdc(-) slouží pro zpětné dobíjení hlavní baterie a dvojice vývodů Vdc(+)1 a Vdc(-)1 slouží pro zpětné dobíjení vedlejšího zdroje energie. Opět chceme-li si zobrazit vnitřní strukturu bloku řízení nabíjení, musíme na tento blok dvakrát kliknout pomocí levého tlačítka myši (obrázek č. 42). Na zobrazené struktuře můžeme vidět DC/DC měnič, který je popsáný v předešlé kapitole (Vytvoření simulačního modelu s jednozdrojovou jednotkou elektromobilu).



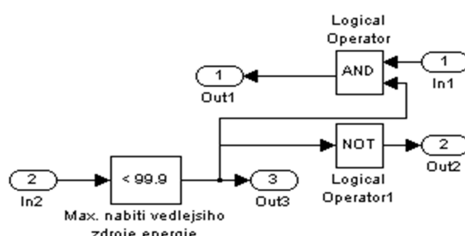
Obr. 41. Box pro řízení nabíjení

Dále vidíme čtyři spínače, kde spínače pět slouží pro připojení nebo odpojení rekuperované energie do hlavní baterie a spínač šest slouží ke stejnému účelu, jen rekuperovaná energie se vrací do vedlejšího zdroje energie. Druhá dvojice spínačů sedm a osm pracuje společně a slouží pro dobíjení vedlejšího zdroje energie z hlavní baterie. Řízení těchto spínačů je umístěno do bloku řídicí logika. Vývojový diagram této řídicí logiky vidíme na obrázku č. 44. Pomocí levého tlačítka myši si dvojitém kliknutím můžeme zobrazit vnitřní strukturu podbloku řídicí logiky (obrázek č. 43).



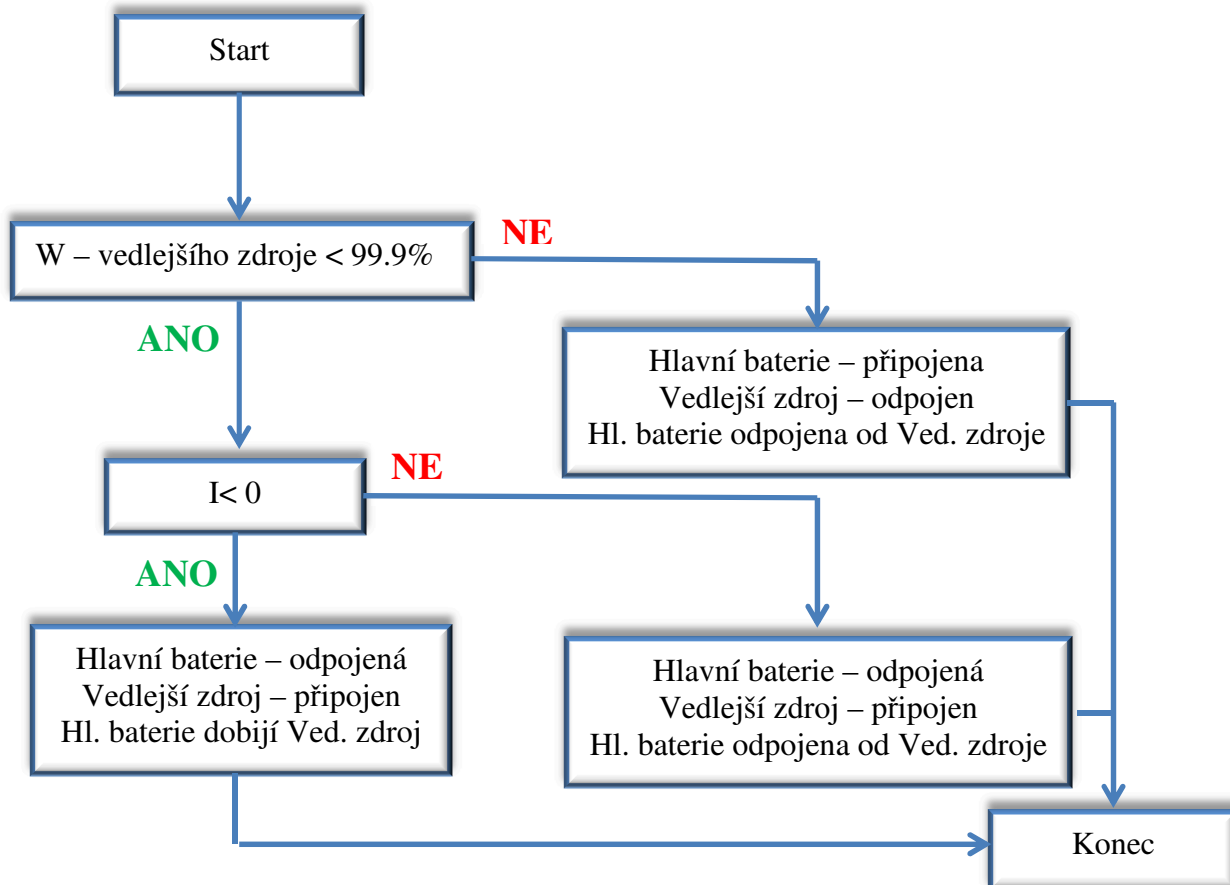
Obr. 42. Zobrazení vnitřní struktury boxu řízení nabíjení

V řídicí logice jsou opět umístěny logické členy. Do řídicí logiky je přivedena hodnota o stavu nabití vedlejšího zdroje energie. Logika pracuje tak, že když hodnota nabití vedlejšího zdroje energie nedosahuje požadovanou hodnotu nabití (což je v našem případě nastavitelná hodnota 99,9%) rekuperovaná energie ze zátěže bude dobíjet přes vypínač šest vedlejší zdroj energie a zároveň bude vedlejší zdroj energie nabíjen přes dvojici vypínačů sedm a osm z hlavní baterie.



Obr. 43. Vnitřní struktura podbloku řídicí logika

Když však hodnota nabíjení dosáhne maximální hodnoty, což je v našem případě nastavená hodnota 99,9%, vedlejší zdroj energie je plně nabit. Dvojice vypínačů sedm a osm se odpojí a tím zruší dobíjení z hlavního zdroje. Dále se odpojí i vypínač šest, což je nabíjení vedlejšího zdroje energie z rekuperované energie zátěže. Po tomto odpojení spínačů se zapíná spínač pět, který přivádí rekuperovanou energii do hlavní baterie. Hlavní baterie se tímto začne také dobíjet.



Obr. 44. Vývojový diagram boxu řízení nabíjení

6 SIMULAČNÍ VÝSLEDKY

➤ Úloha 1.

Spotřebovaná energie jednozdrojové soustavy:

Baterie = 21.57 Wh

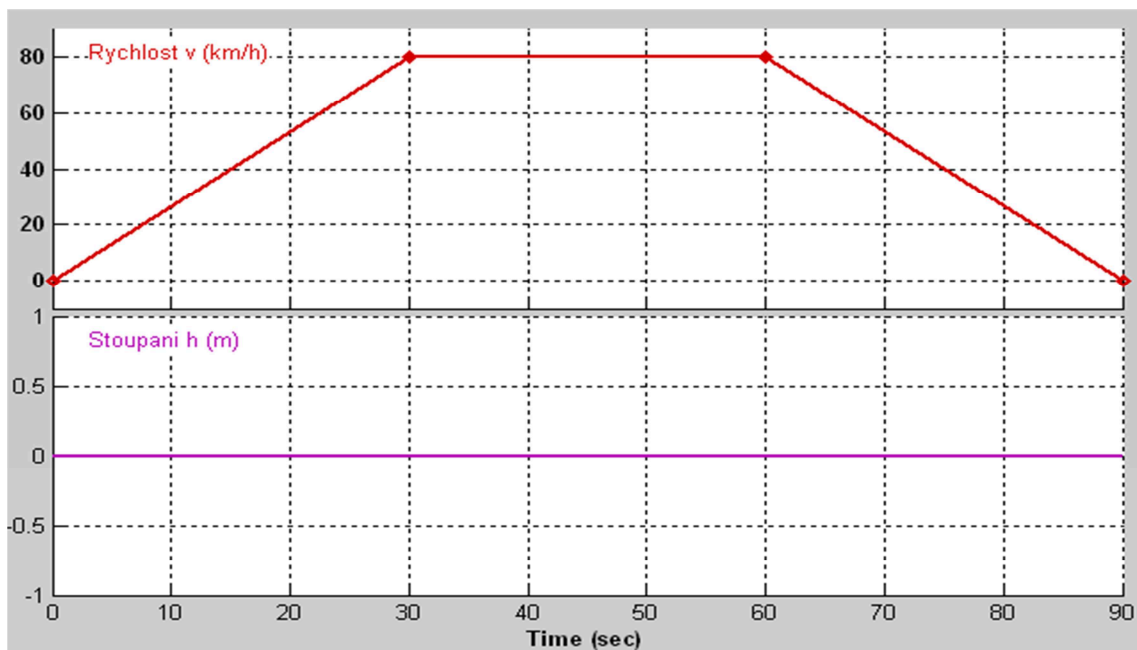
Spotřebovaná energie vícezdrojové soustavy:

Hlavní baterie = 24.81Wh

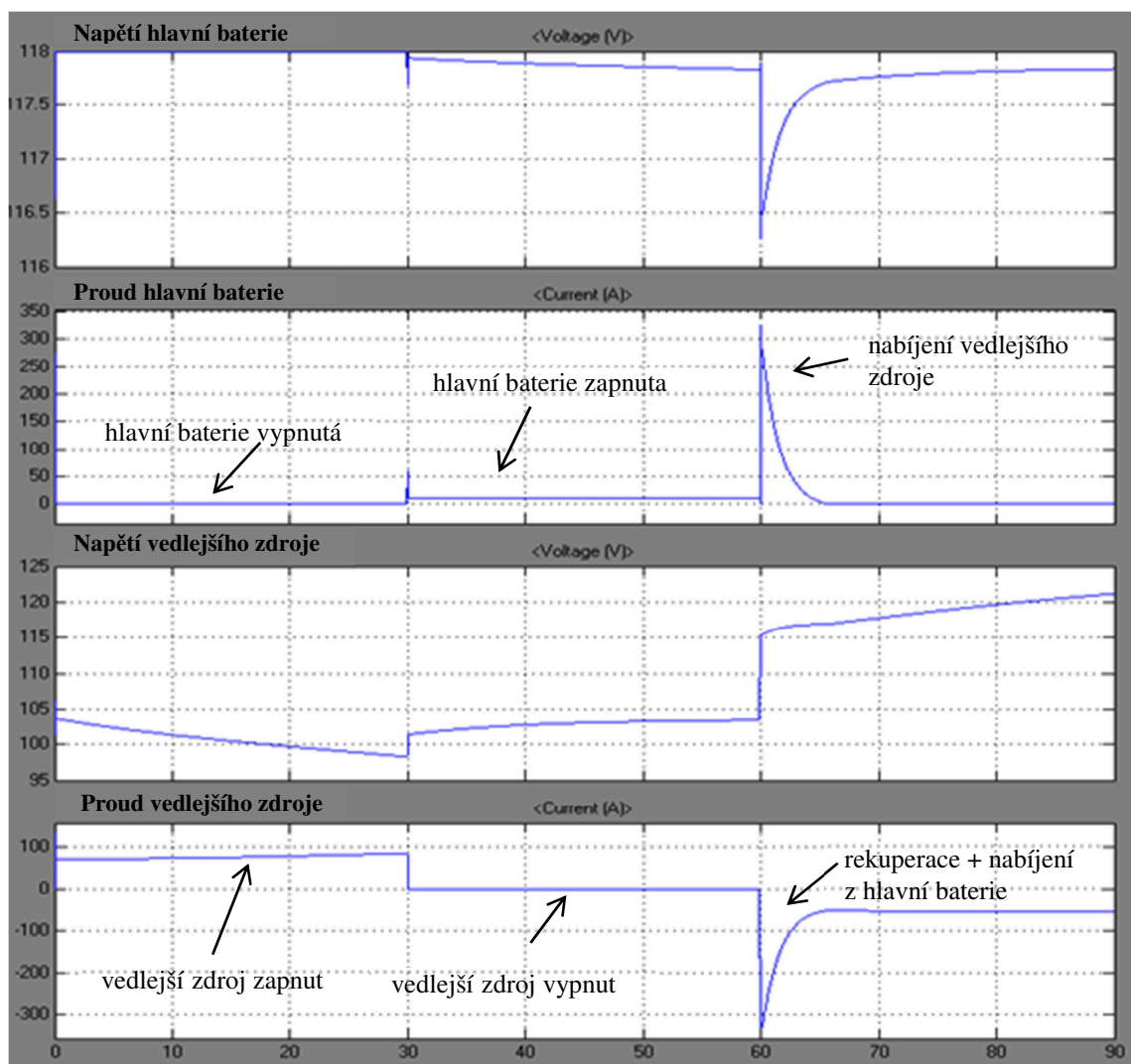
Vedlejší zdroj = -3.079 Wh

Na obrázku č. 45 vidíme profil trati, kde se auto rozjíždí z 0km/h na 80km/h v čase 0-30s., poté udržuje konstantní rychlost 80km/h po dobu 30-60s. a nakonec vozidlo zpomaluje až na 0km/h v čase 60-90s. Tento průběh má nastaveno stoupání na 0%, což představuje jízdu po rovině.

V grafu č. 1 vidíme v horní polovině průběh napětí a proudu hlavní baterie a na dolní polovině průběh napětí a proudu vedlejšího zdroje energie (graf 1). Zaměříme se na průběhy proudu. Jak můžeme vidět v první části, vede proud vedlejší zdroj, což se děje při rychlém rozjezdu (čili při vysokém proudu). Dále následuje konstantní rychlost (tedy snížení proudu), zde se zdroje přepínají a energie je odebírána z hlavní baterie. V posledním úseku dochází k uvolnění plynového pedálu, tedy k motorickému brždění (rekuperaci energie), kde se touto rekuperací začne dobíjet vedlejší zdroj a zároveň při rekuperaci dochází k dobíjení vedlejšího zdroje z hlavního zdroje. V porovnání spotřeby energie vidíme, že jednozdrojová soustava má nižší hodnotu spotřebované energie, než soustava vícezdrojová. To je dáno tím, že ve vícezdrojové soustavě dochází k dobíjení vedlejšího zdroje energie z hlavní baterie.



Obr. 45. Profil trati



Graf. 1 Jízda po rovině

➤ Úloha 2.

Spotřebovaná energie jednozdrojové soustavy:

Baterie = 88.18 Wh

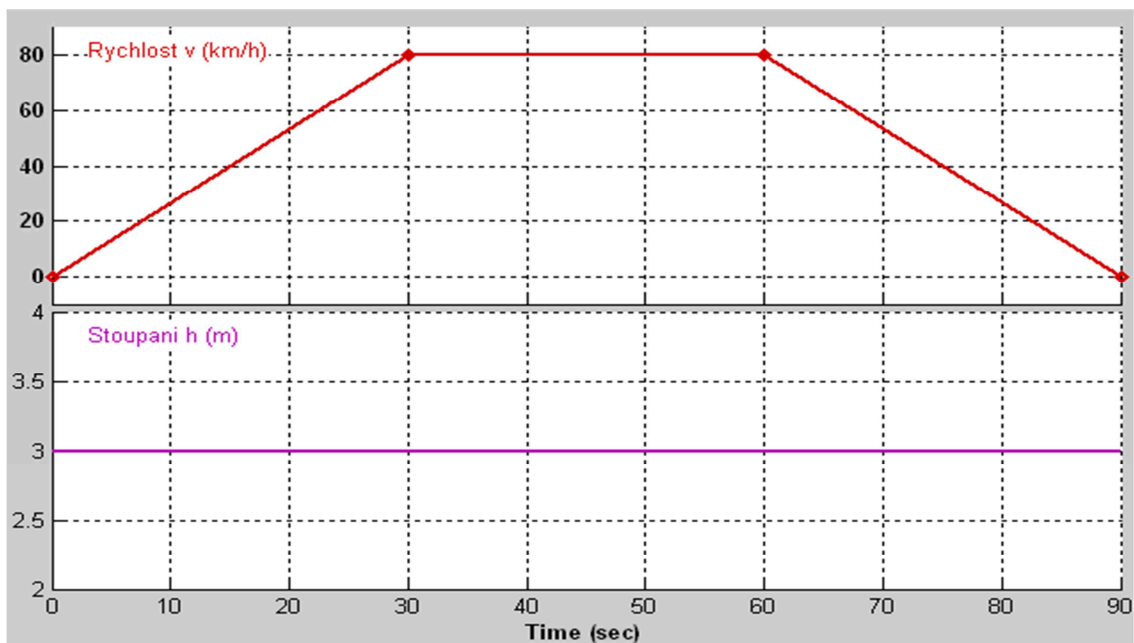
Spotřebovaná energie vícezdrojové soustavy:

Hlavní baterie = 64.27 Wh

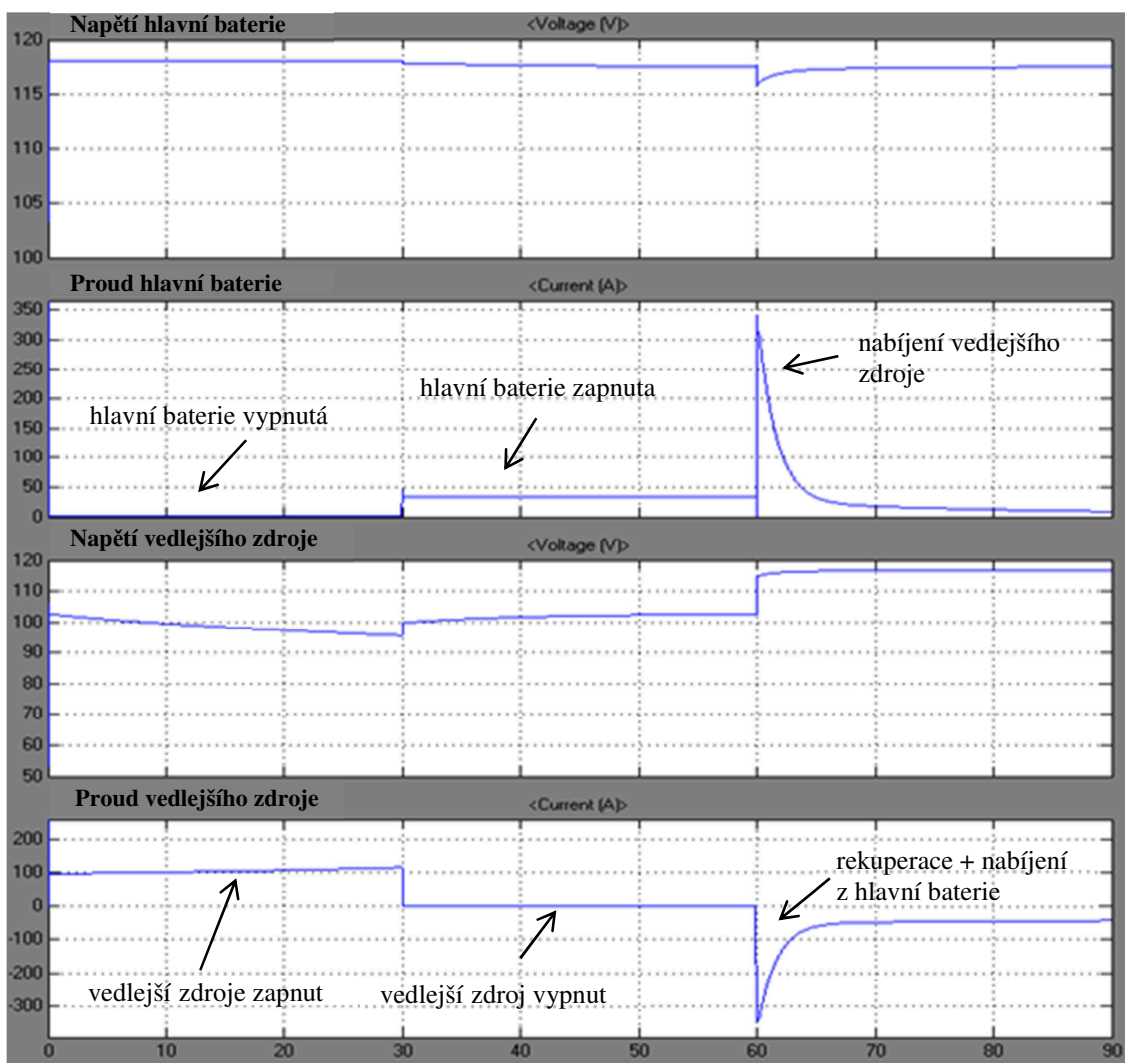
Vedlejší zdroj = 24.25 Wh

Na obrázku č. 2 vidíme průběh trati, která je obdobná jako v předešlé úloze, ovšem je nastaveno stoupaní na 3%, což představuje jízdu do kopce.

V grafu 2 vidíme obdobné průběhy proudu a napětí hlavního a vedlejšího zdroje energie jako v předchozí úloze 1, s tím rozdílem, že vozidlo se pohybuje do kopce, což má za následek větší proudy v soustavě. Tato varianta je pro jednozdrojovou soustavu horší i přesto, že ve vícezdrojové soustavě, hlavní zdroj dobíjí vedlejší zdroj při vzniklé rekuperaci.



Obr. 46. Profil trati



Graf 2. Jízda do kopce

➤ Úloha 3.

Spotřebovaná energie jednozdrojové soustavy:

Baterie = -45.04 Wh

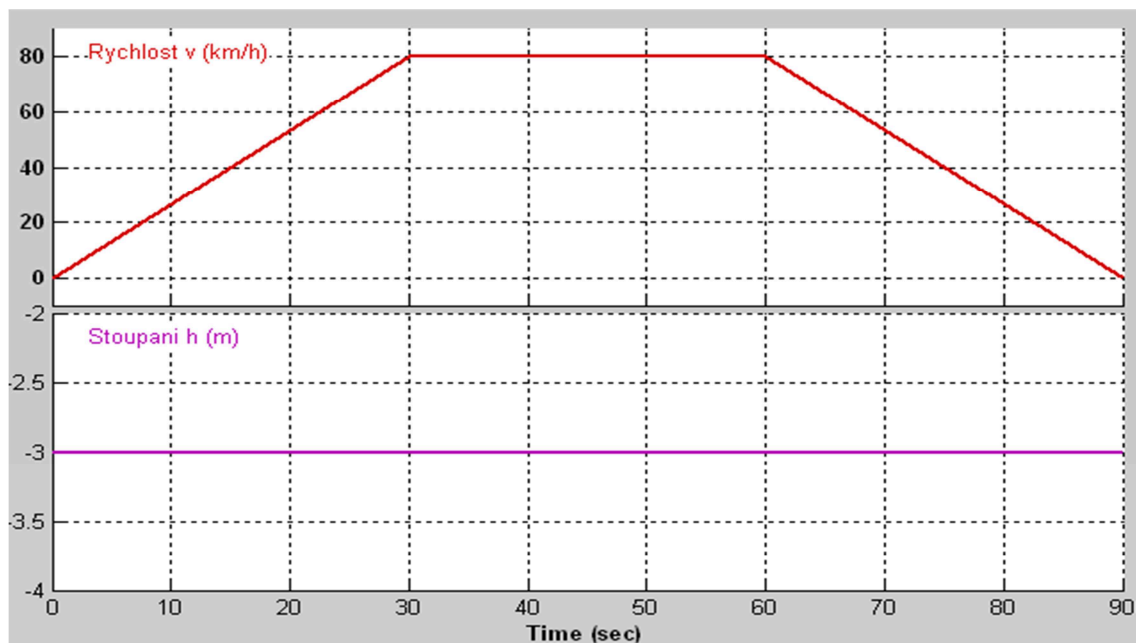
Spotřebovaná energie vícezdrojové soustavy:

Hlavní baterie = -45.02 Wh

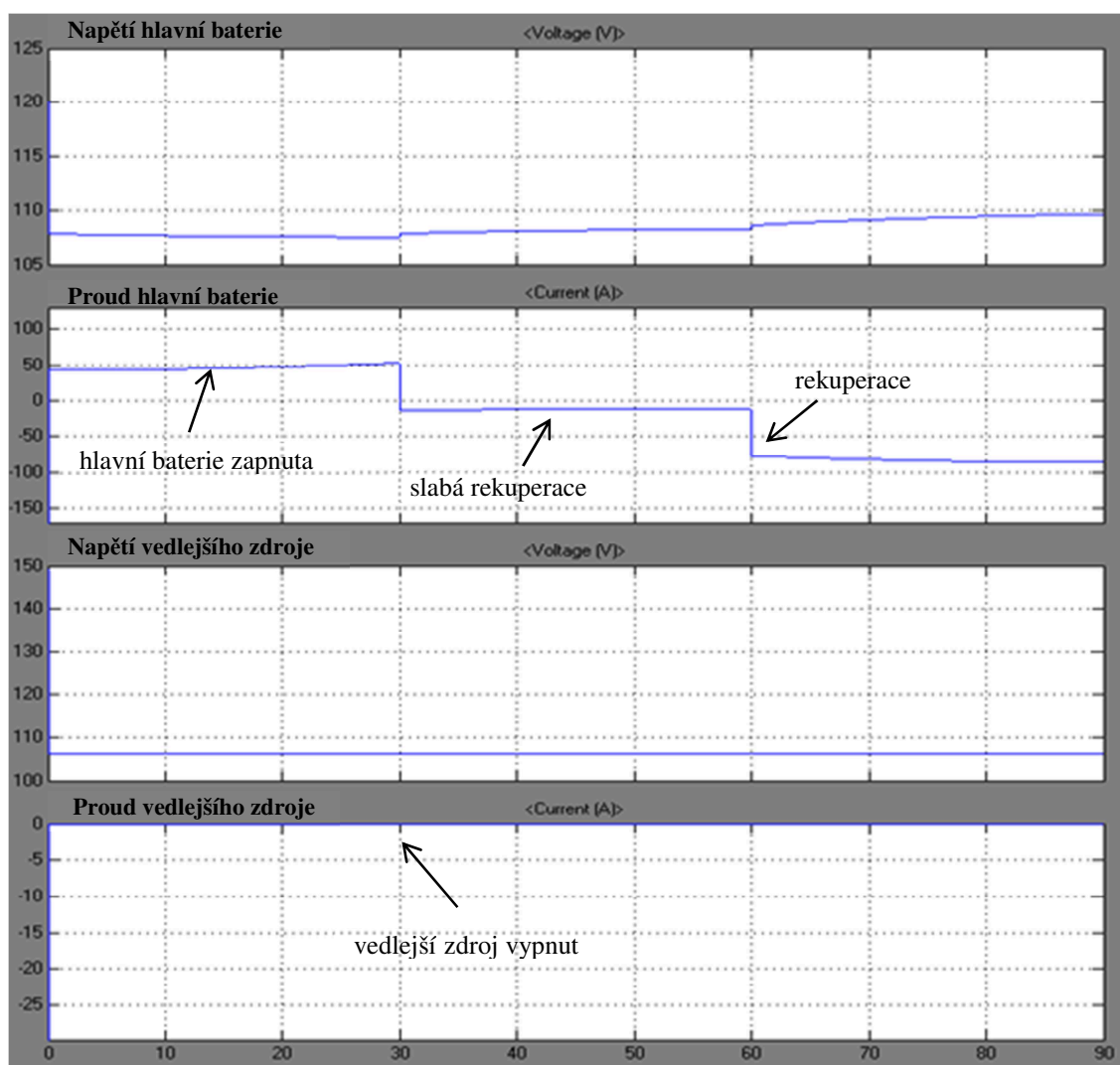
Vedlejší zdroj = 0 Wh

Na obrázku č. 3 vidíme opět stejný průběh jako v předchozích úlohách 1 a 2. Tentokrát je stoupání nastaveno na -3%, což představuje jízdu z kopce.

V této úloze se spotřebovaná energie v obou variantách soustav (jednozdrojové, vícezdrojové) shoduje. Protože ve vícezdrojové soustavě není zapotřebí využití vedlejšího zdroje energie (graf 3), tudíž zůstává nabit na 100%, veškerá energie je odebírána a poté opět vrácena do hlavního zdroje (baterie).



Obr. 47. Profil trati



Graf 3. Jízda z kopce

➤ Úloha 4.

Spotřebovaná energie jednozdrojové soustavy:

Baterie = 48.58 Wh

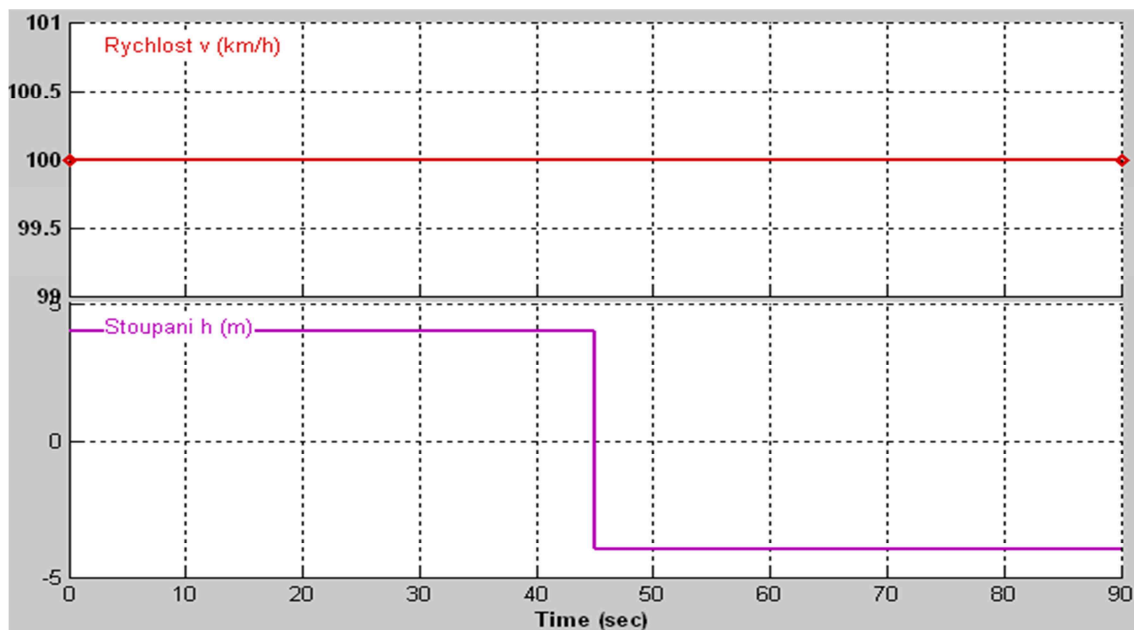
Spotřebovaná energie vícezdrojové soustavy:

Hlavní baterie = 48.61 Wh

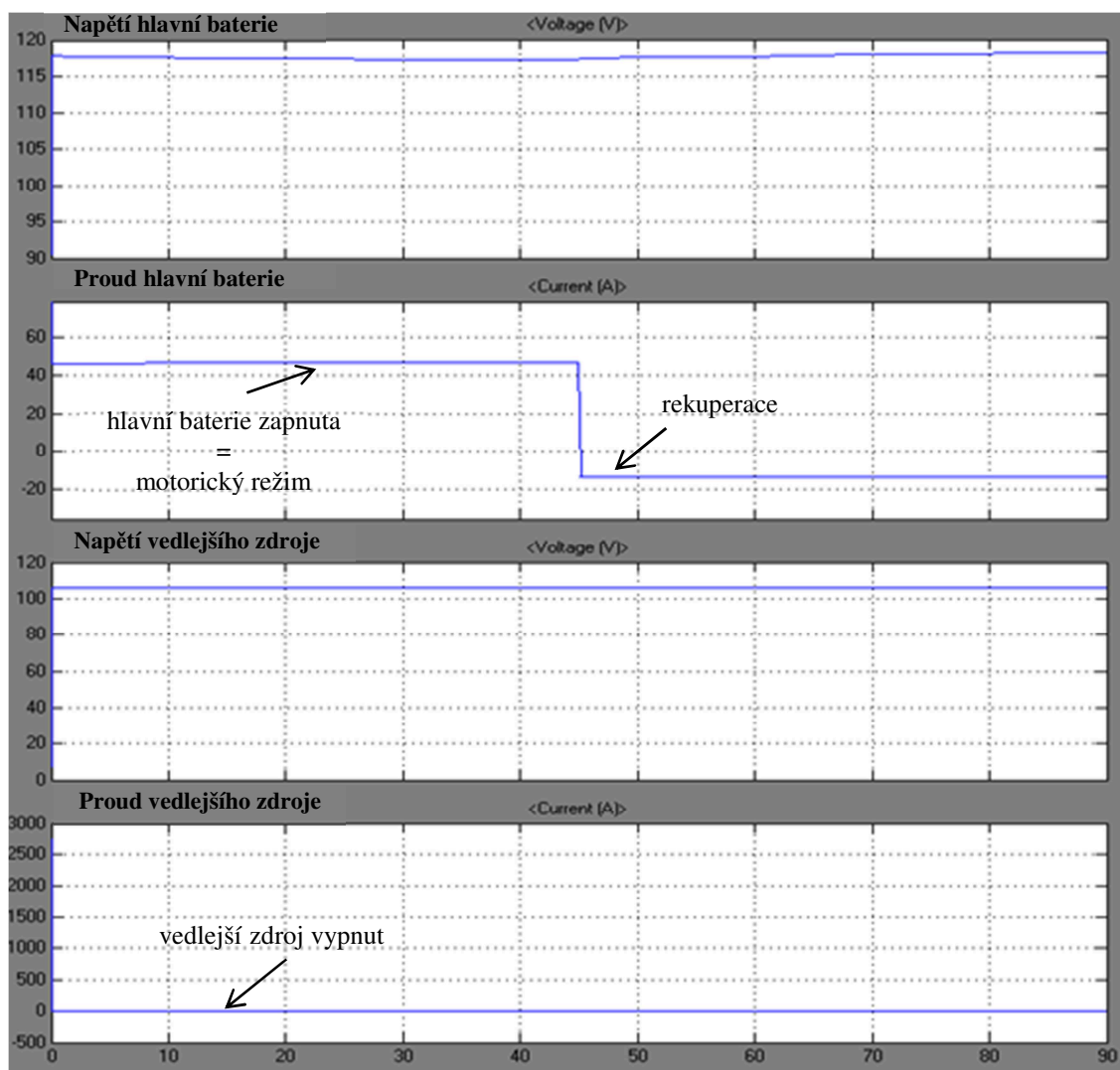
Vedlejší zdroj = 0 Wh

Na profilu trati (obrátek č. 48) vidíme konstantní rychlost 100km/h po celou dobu simulace, dále vidíme konstantní stoupaní v čase od 0s do 45s a poté následné konstantní klesání od 45s do konce simulace. Stoupání je nastaveno v první polovině na 4% a v druhé polovině na -4%.

Při jízdním cyklu se nedoporučuje spouštět vedlejší zdroj energie, protože nemá dostatečnou kapacitu, aby zvládl tuto trať. Při zapojení do provozu i vedlejší zdroj energie dochází k jeho okamžitému vybití. Proto je vhodné, aby v této situaci byla elektrická energie obstarávána pouze z hlavního zdroje. Na grafu 4 vidíme, že hlavní zdroj zvládá nasimulovanou úlohu dobře i samostatně.



Obr. 48. Profil trati



Graf 4. Jízda do kopce i z kopce

➤ Úloha 5.

Spotřebovaná energie jednozdrojové soustavy:

Baterie = 48.58 Wh

Spotřebovaná energie vícezdrojové soustavy:

V této úloze jsem provedl dvě varianty

1. Varianta

Hlavní baterie = -20.12 Wh

Vedlejší zdroj = 68.72 Wh

2. Varianta

Hlavní baterie = 74.93 Wh

Vedlejší zdroj = -25.75 Wh

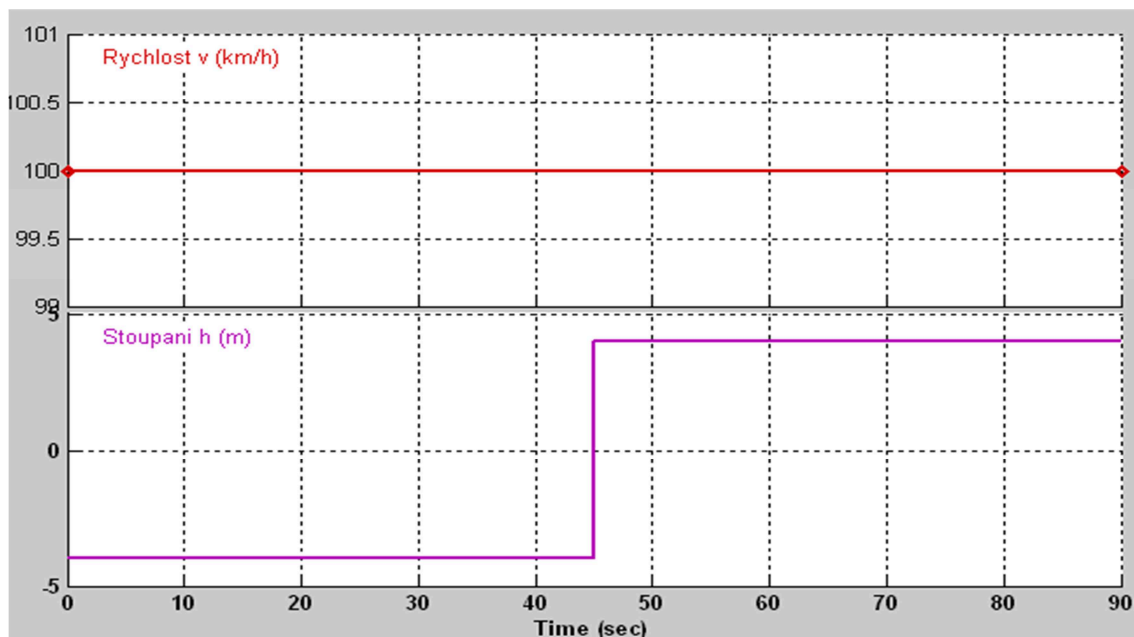
Tento profil trati je opět obdobou trati v úloze 4 s tím rozdílem, že je přehozeno stoupaní, tedy v první polovině trati jede vozidlo z kopce (stoupání nastaveno na -4%) a v druhé polovině trati do kopce (stoupání nastaveno na 4%).

Úloha je navržena tak, že je vhodné, aby hlavní nebo vedlejší zdroj energie nebyly plně nabity, protože v prvních metrech (okamžiku) trati vzniká rekuperovaná energie a až poté motorický chod.

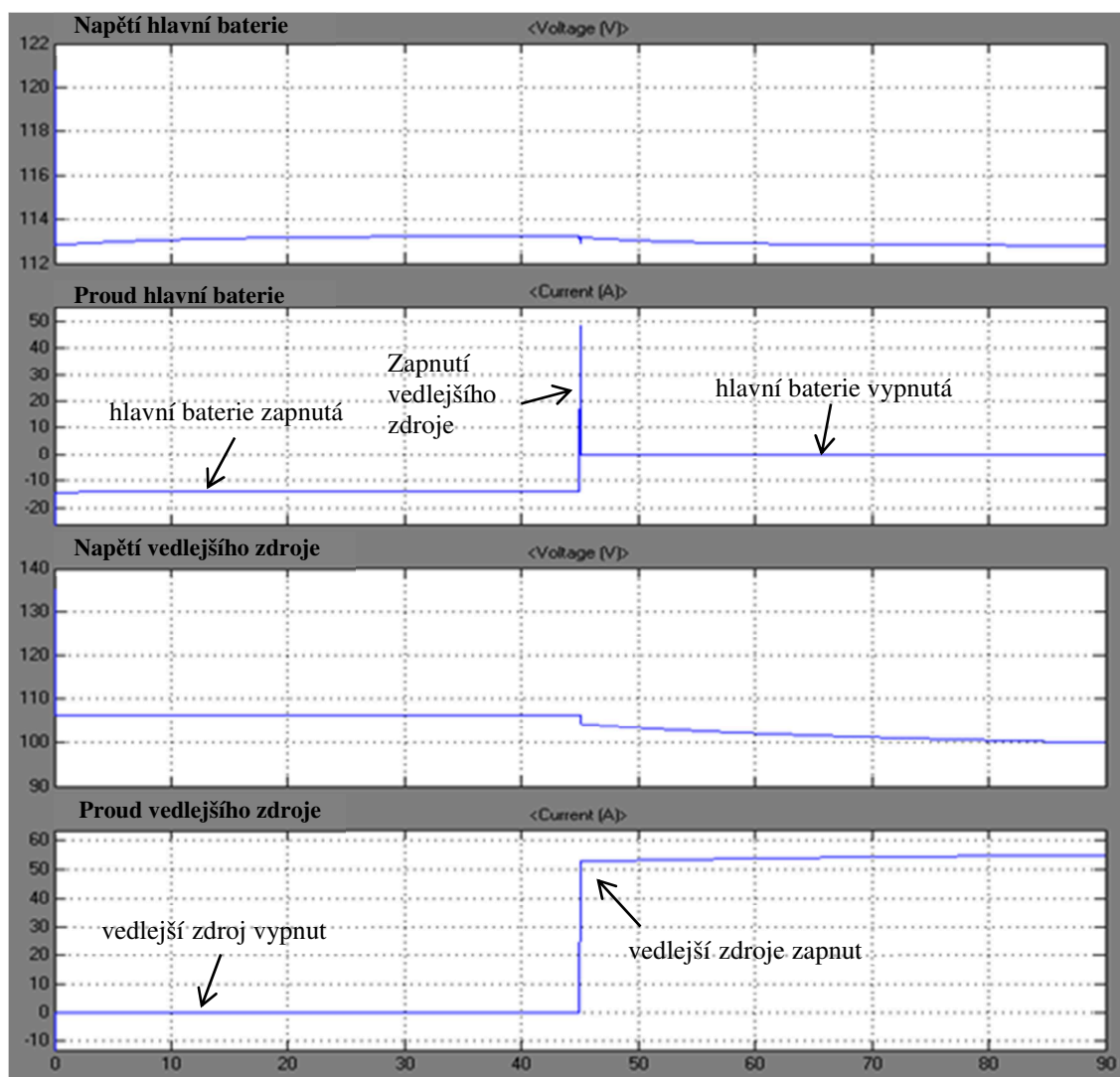
V první variantě je snížena energie hlavní baterie na 90% (graf 5). V prvním úseku tratě 0 – 45 sekund se vrací energie do hlavního zdroje a v druhém úseku tratě 45-90 sekund se odebírá energie z vedlejšího zdroje.

V druhé variantě je snížena energie vedlejšího zdroje na 90% (graf 6). Tedy v první části trati 0 – 45sekund se při rekuperaci nabíjí vedlejší zdroj a zároveň je nabíjen i z hlavní baterie. V druhé části trati 45 – 90 sekund je opět odebírána energie z vedlejšího zdroje energie.

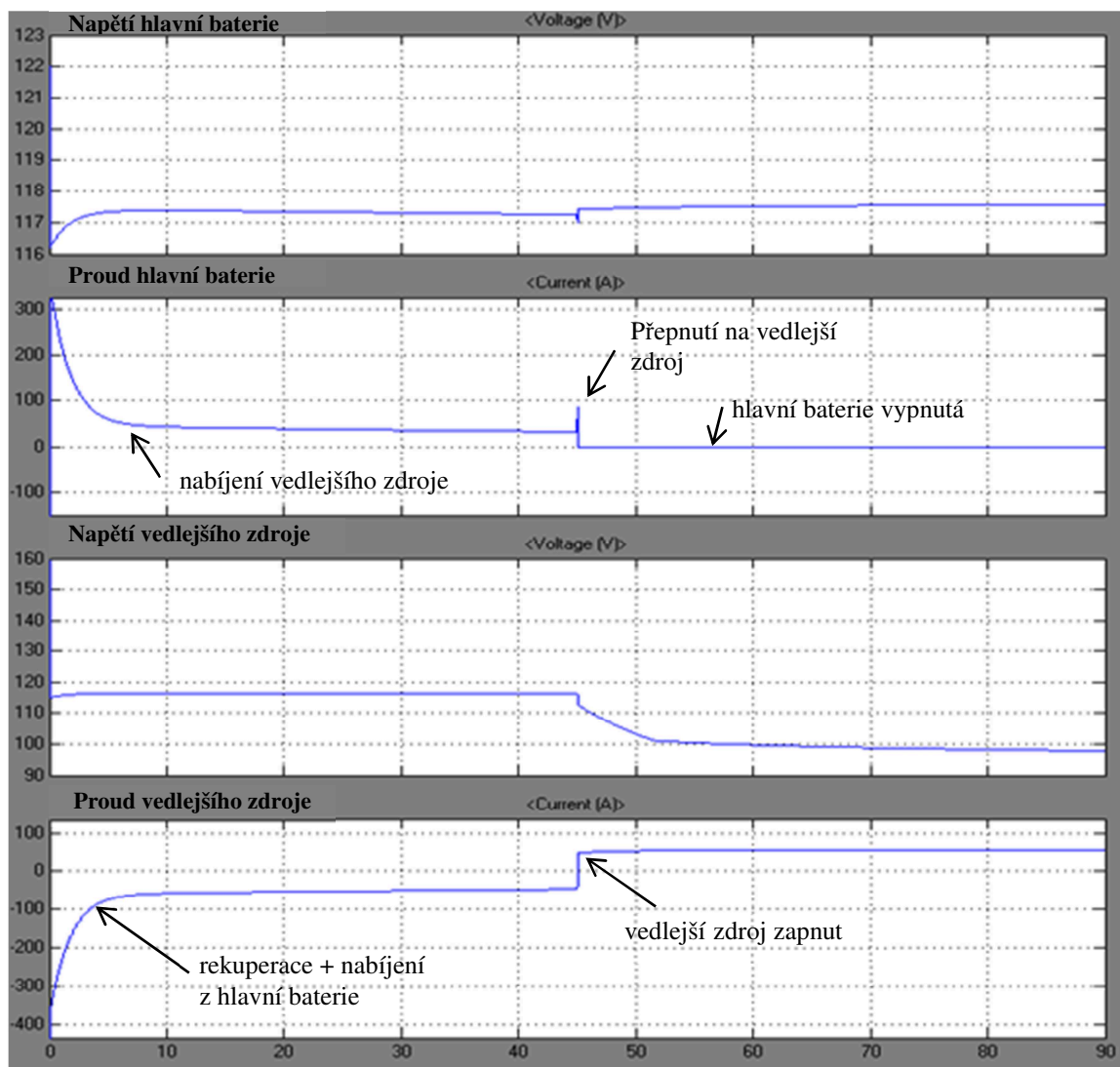
Celková spotřeba energie je u druhé varianty horší jak vůči první variantě, tak jednozdrojové soustavě. Doporučujeme tedy první variantu.



Obr. 49. Profil trati



Graf 5. Snížení energie hlavního zdroj



Graf 6. Snížená energie vedlejšího zdroje

➤ Úloha 6.

Spotřebovaná energie jednozdrojové soustavy:

Baterie = 48.58 Wh

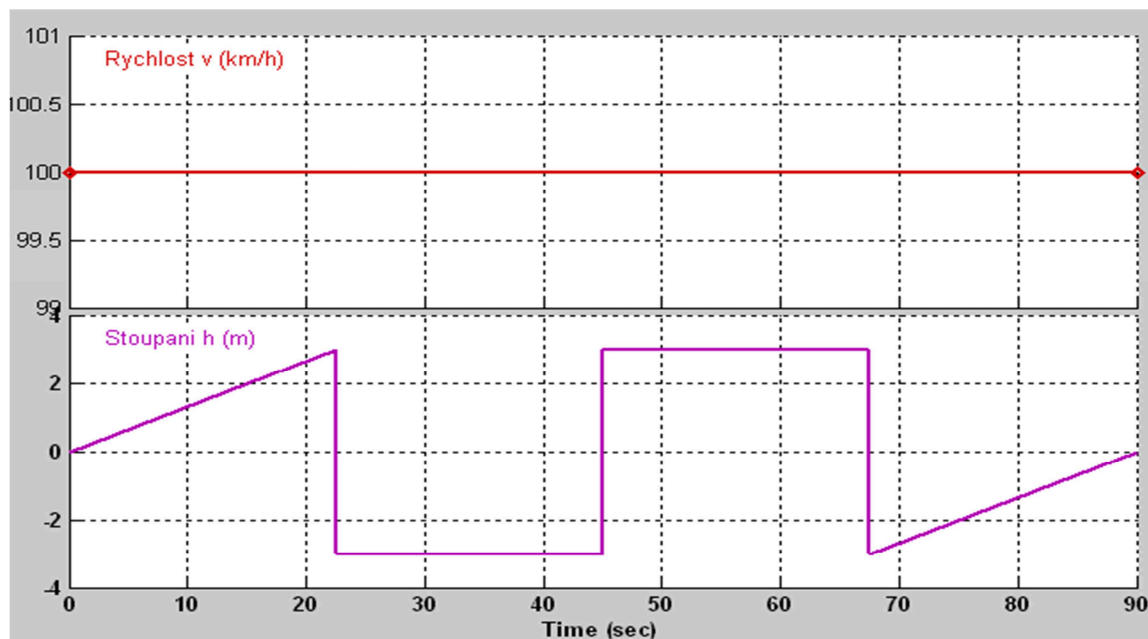
Spotřebovaná energie vícezdrojové soustavy:

Hlavní baterie = 46.09 Wh

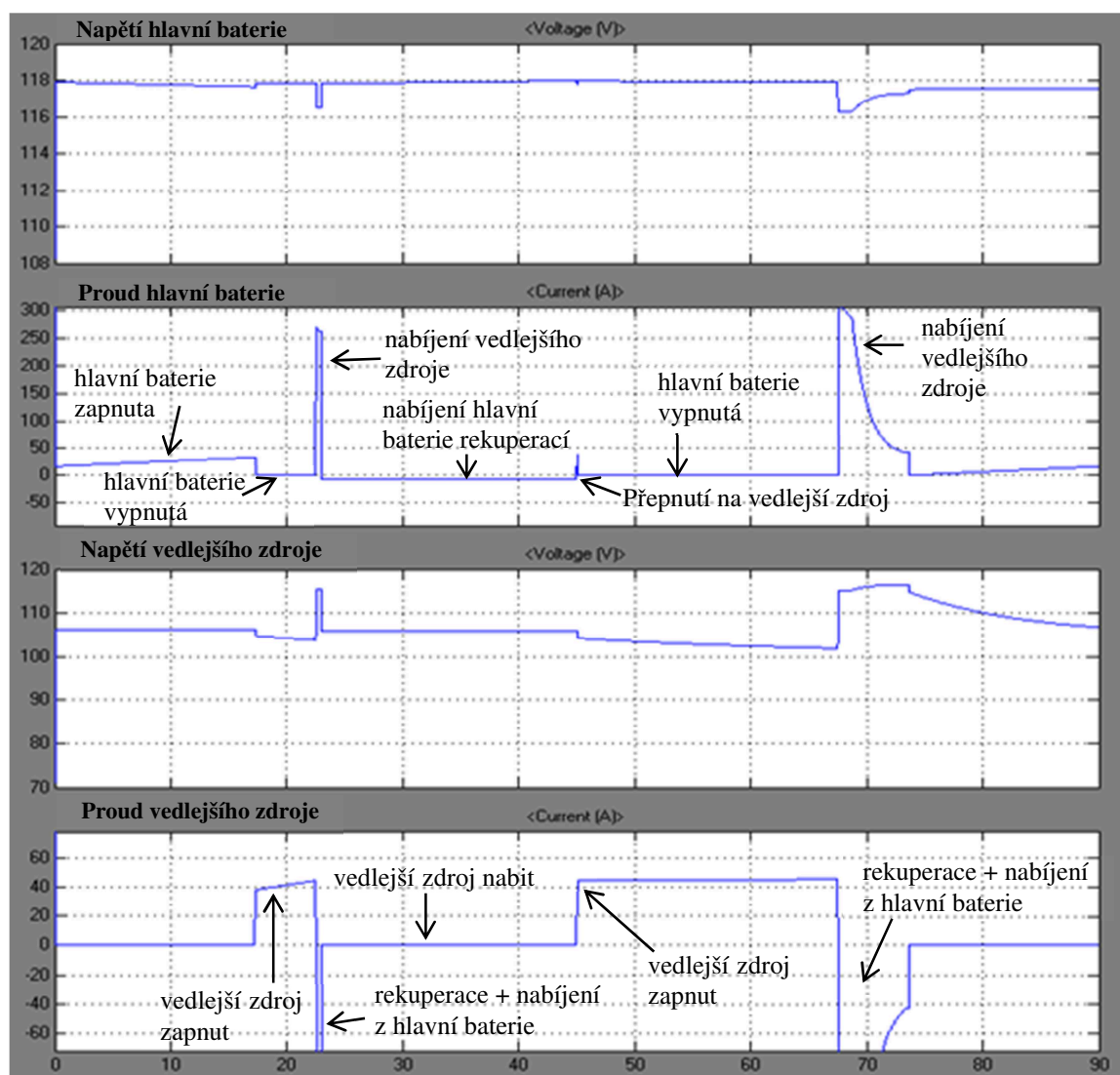
Vedlejší zdroj = 2.78 Wh

Tento profil trati znázorňuje jízdu do kopce a z kopce vícekrát za sebou, při konstantní rychlosti 100km/h. Stoupání je voleno do kopce 3% a z kopce -3%.

U úlohy je vhodný pomalý nárůst stoupání, aby nedošlo k okamžitému vybití vedlejšího zdroje energie. Vedlejší zdroj energie opět pokrývá špičkové proudy a při rekuperaci je zpětně dobíjen jak rekuperovanou energií, tak hlavní baterií. V grafu 7 vidíme spolupráci zdrojů energií, a ve 23 a 70 sekundách vidíme dobíjení vedlejšího zdroje energie z hlavní baterie při rekuperaci.



Obr. 48. Profil trati



Graf 7. Simulační výsledky úlohy 6

➤ Úloha 7.

Spotřebovaná energie jednozdrojové soustavy:

Baterie = 48.57 Wh

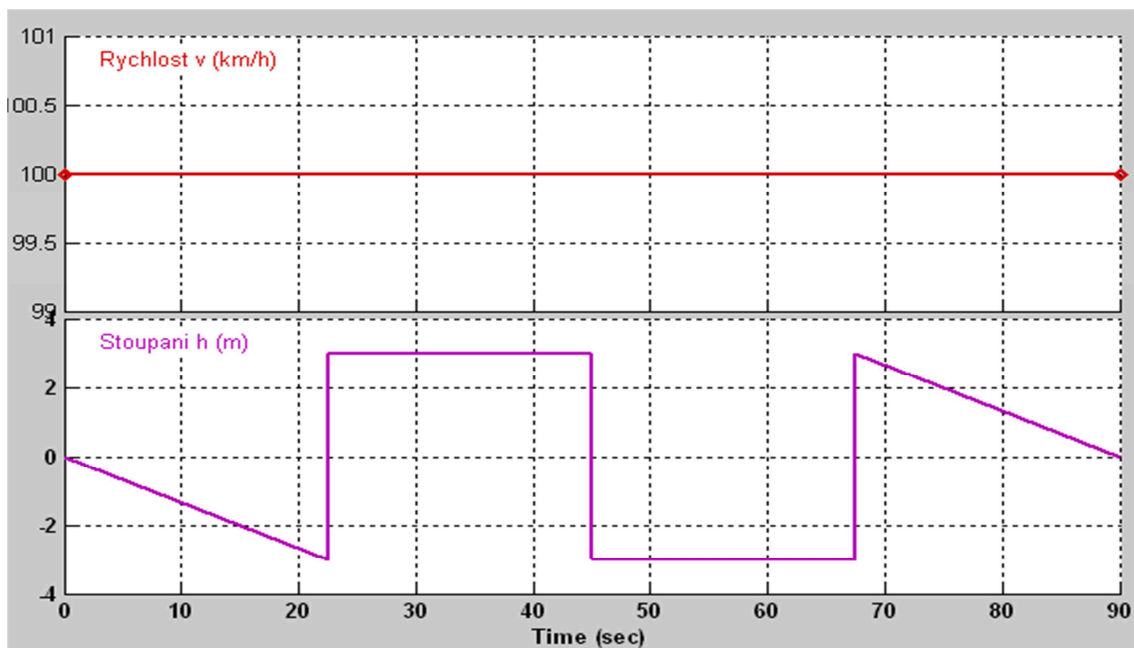
Spotřebovaná energie vícezdrojové soustavy:

Hlavní baterie = 43.1 Wh

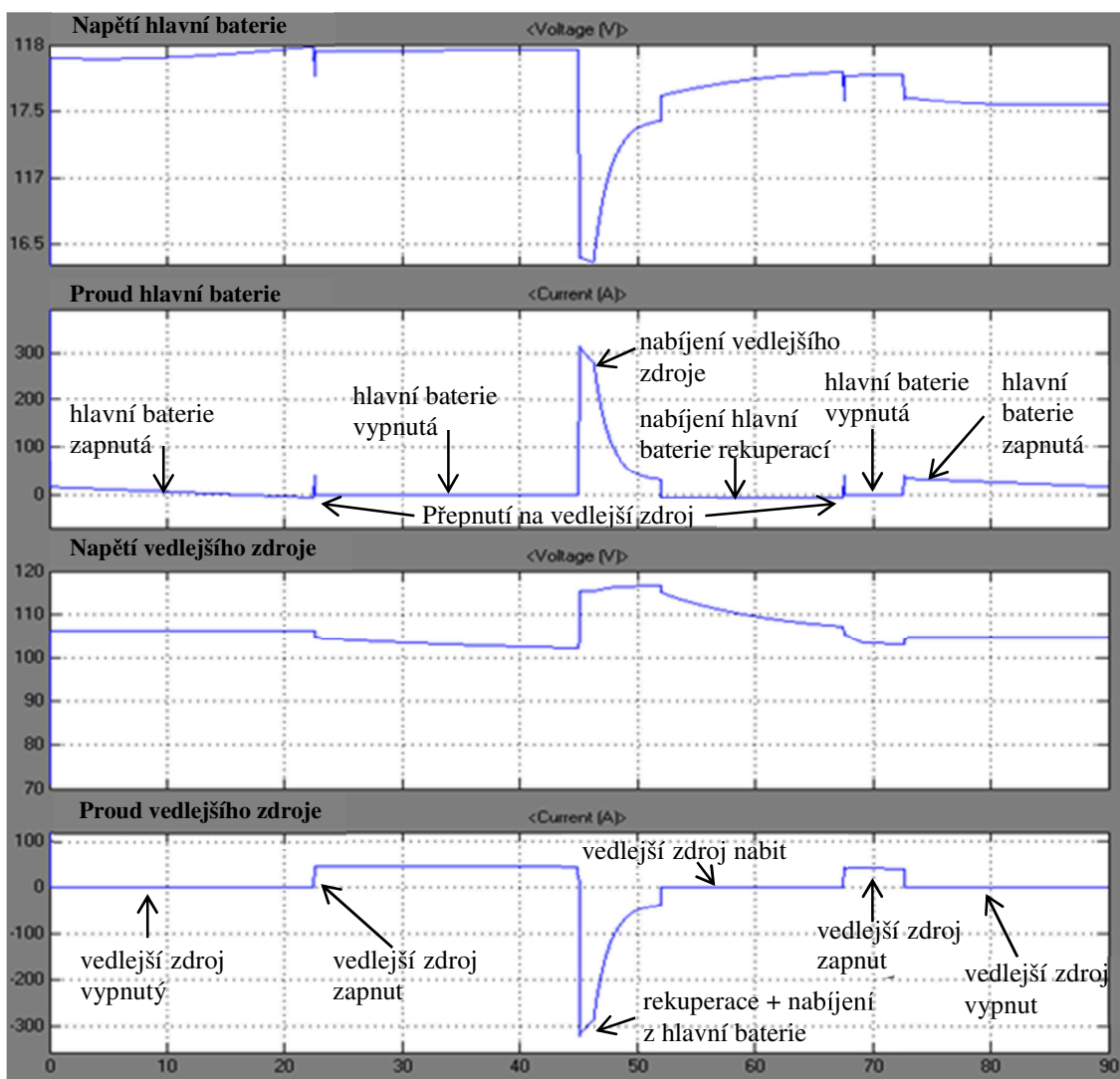
Vedlejší zdroj = 5.73 Wh

Tento profil trati znázorňuje obdobnou profilovou trať jako v úloze 6. S tím rozdílem že, trať začíná jízdou z kopce (klesáním -3%) a poté do kopce (stoupáním 3%), opět při konstantní rychlosti 100km/h.

V této úloze vychází vícezdrojová jednotka ještě lépe než v předchozí úloze. V provedené simulaci nevznikají příliš velké proudy. Je tedy možné, aby tuto trať zvládl i samostatně hlavní zdroj energie, ovšem pro názornost a srovnání s předešlou úlohou 6 bylo provedeno nastavení i s vedlejším zdrojem energie.



Obr. 49. Profil trati



Graf 8. Simulační výsledky úlohy 7

➤ Úloha 8.

Spotřebovaná energie jednozdrojové soustavy:

Baterie = 160.7 Wh

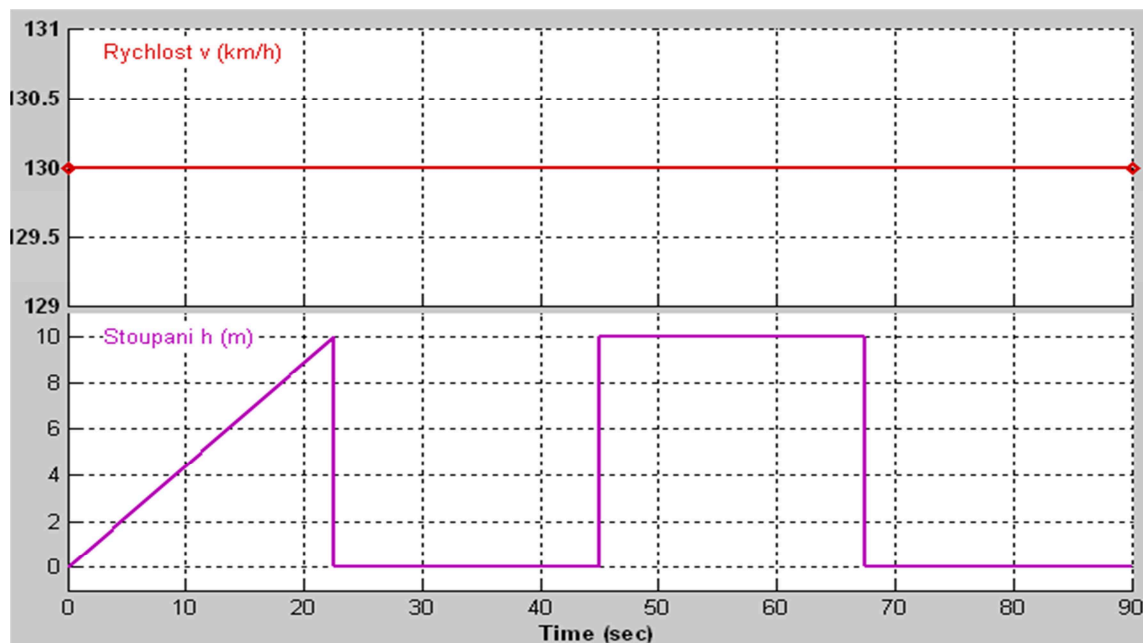
Spotřebovaná energie vícezdrojové soustavy:

Hlavní baterie = 39.7 Wh

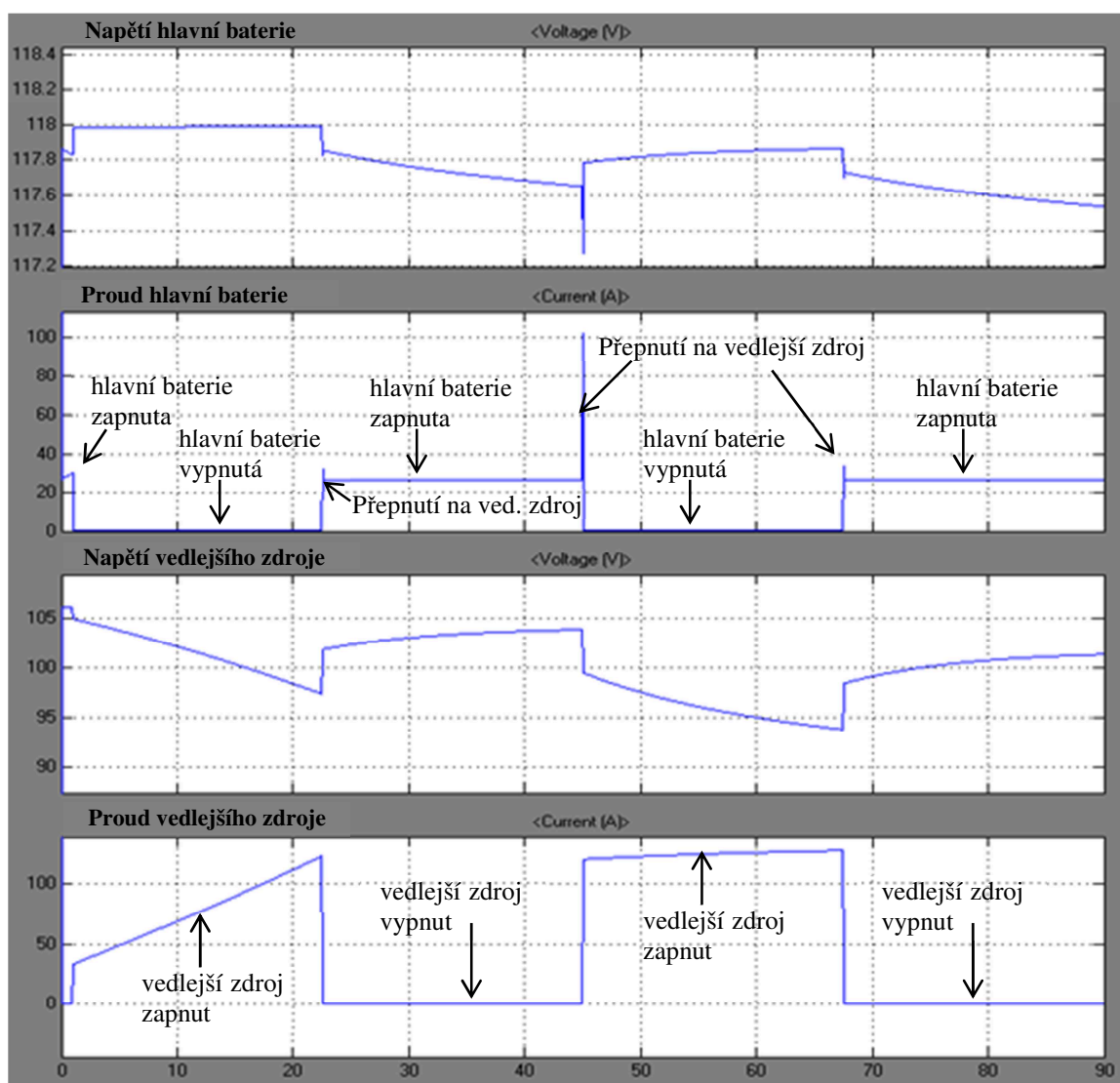
Vedlejší zdroj = 121.2 Wh

V této úloze zvládá s nastaveným stoupáním (10%) rychlost 115km/h pouze vedlejší zdroj energie samostatně. Proto bylo změněno nastavení tak, aby pracovaly oba zdroje energie. Nastavená rychlost a stoupání představuje jízdu vozidla například po dálnici (tedy 130km/h). Aby bylo dosaženo co nejlepší efektivity spotřeby energie hlavní baterie, je nutné nastavit logické hodnoty zapnutí vedlejšího zdroje energie a vypnutí hlavního zdroje na 35 ampér.

V grafu 9 vidíme, že vždy, kdy nastane zrychlení vozidla či jízda do kopce (zvětší se proudová hodnota) je energie odebírána z vedlejšího zdroje. Při konstantní jízdě (po rovince) je energie odebírána z hlavního zdroje.



Obr. 50. Profil trati



Graf 9. Průběhy napětí a proudů demonstrující jízdu po dálnici

➤ Úloha 9.

Spotřebovaná energie jednozdrojové soustavy:

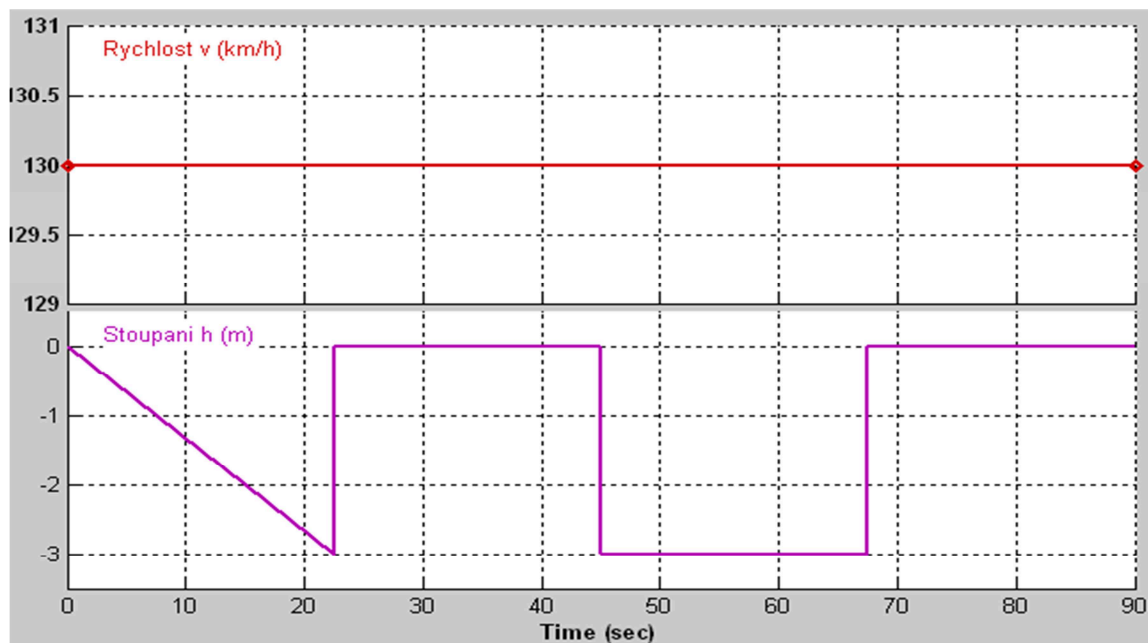
Baterie = 52.52 Wh

Spotřebovaná energie vícezdrojové soustavy:

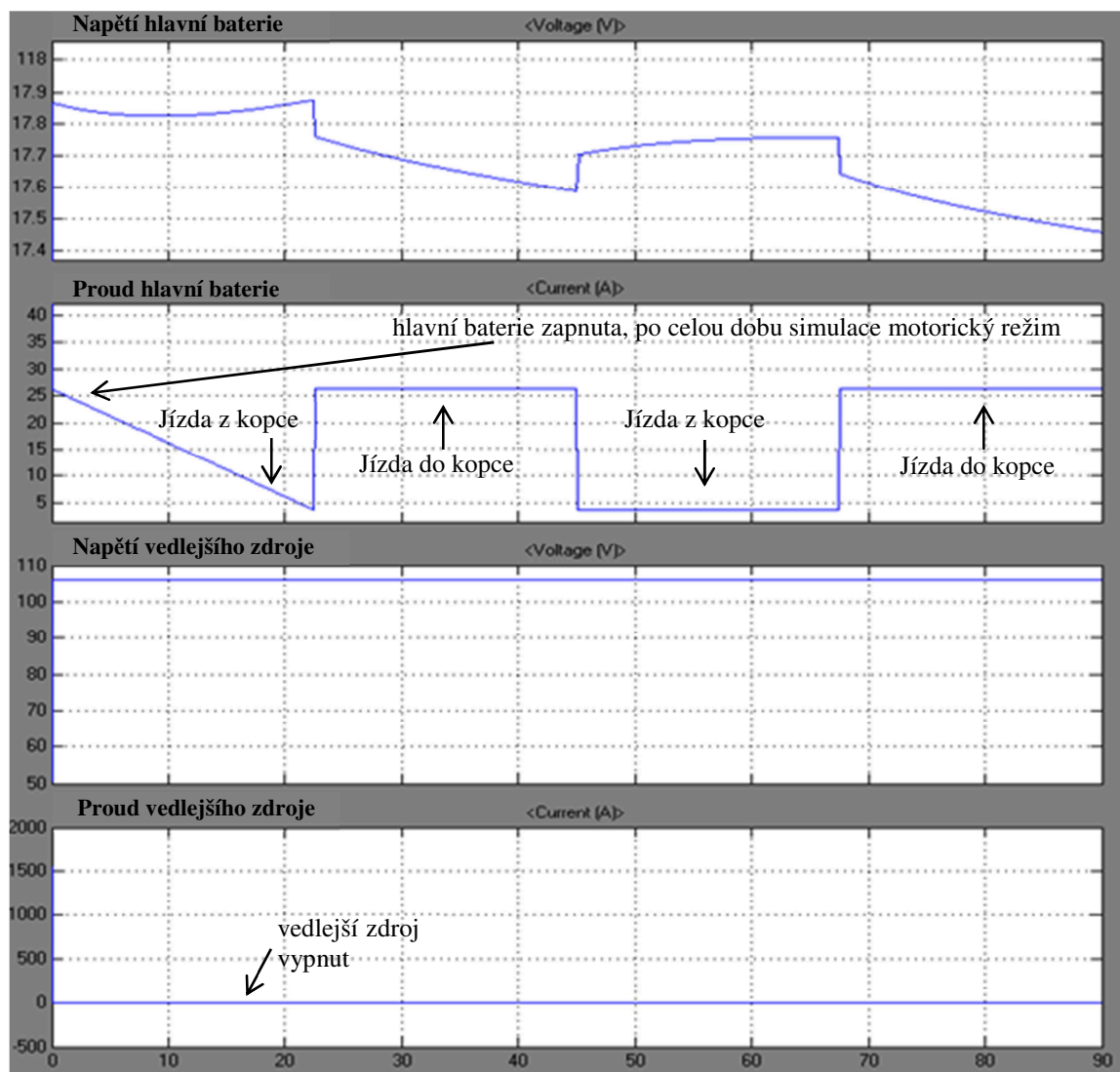
Hlavní baterie = 52.53 Wh

Vedlejší zdroj = 0 Wh

V této úloze je obdobná situace jako v úloze 3. Hlavní baterie zvládne trať pouze na svou energii, tudíž vedlejší zdroj energie nemusí být spuštěn (nízké proudy). Spotřebovaná energie jednozdrojové a vícezdrojové jednotky se tedy rovná.



Obr. 51 Profil trati



Graf 10. Průběhy napětí a proudů demonstrující rychlé jízdy z kopce

Shrnutí výsledků z naměřených úloh:

Jednozdrojová soustava	Vícezdrojová soustava
Spotřebovaná energie	
Úloha 1	Hlavní baterie = 24,81 Wh
Baterie = 21,57 Wh	Vedlejší zdroj = -3,079 Wh
Úloha 2	Hlavní baterie = 64,27 Wh
Baterie = 88,18 Wh	Vedlejší zdroj = 24,25 Wh
Úloha 3	Hlavní baterie = -45,02 Wh
Baterie = -45,04 Wh	Vedlejší zdroj = 0 Wh
Úloha 4	Hlavní baterie = 48,61 Wh
Baterie = 48,58 Wh	Vedlejší zdroj = 0 Wh
Úloha 5	1. Varianta
	Hlavní baterie = -20,12 Wh
Baterie = 48,57 Wh	Vedlejší zdroj = 68,72 Wh
Úloha 5	2. Varianta
	Hlavní baterie = 74,93 Wh
Baterie = 48,57 Wh	Vedlejší zdroj = -25,75 Wh
Úloha 6	Hlavní baterie = 46,09 Wh
Baterie = 48,58 Wh	Vedlejší zdroj = 2,78 Wh
Úloha 7	Hlavní baterie = 43,1 Wh
Baterie = 48,57 Wh	Vedlejší zdroj = 5,73 Wh
Úloha 8	Hlavní baterie = 39,7 Wh
Baterie = 160,7 Wh	Vedlejší zdroj = 121,2 Wh
Úloha 9	Hlavní baterie = 52,53 Wh
Baterie = 52,52 Wh	Vedlejší zdroj = 0 Wh

Tabulka 1. Výsledky naměřených úloh

V tabulce vidíme souhrn výsledků jednotlivých simulačních úloh. Z výsledků můžeme usoudit, že vícezdrojová jednotka pracuje výrazně efektivněji, než jednotka jednozdrojová.

Z výsledků vytvoříme tři úrovně spotřeby energie:

- Úlohy, kdy spotřebovaná energie je lepší u vícezdrojové jednotky (2, 5, 6, 7).

V úloze 8 byla provedena simulace minimální spotřeby energie z hlavní baterie. Zde vidíme tedy výrazný rozdíl mezi zdroji jednozdrojové baterie a hlavní baterii vícezdrojové soustavy.

- Úlohy, kde se spotřebované energie sobě rovnají (3, 4, 9)
- Úlohy, kde je spotřebovaná energie horší u vícezdrojové jednotky (1)

V této úloze 1 by nedošlo k horší spotřebě energie, kdybychom zamezili nabíjení vedlejšího zdroje energie z hlavní baterie. Po tomto zamezení by se spotřeby energie rovnaly.

ZÁVĚR

Úkolem práce bylo namodelovat jednozdrojovou a vícezdrojovou (hybridní) jednotku elektromobilu v programu Matlab – Simulink.

Jednozdrojová jednotka obsahuje jeden zdroj energie, DC/DC měnič a zátěž. Principiálně systém pracuje tak, že potřebná energie pro zátěž se odebírá ze zdroje (motorický chod) a případná vznikající energie se opět do zdroje vrací (rekuperační chod).

Vícezdrojová jednotka navíc obsahuje i spínací logiku, která ovládá zdroje energie jak při motorickém, tak při rekuperovaném režimu. Stručný popis funkce ovládání s předpokladem, že vozidlo pojede po rovině:

Akcelerace vozidla způsobí velký odběr energie (rozjezd z nulové rychlosti na osmdesát kilometrů za hodinu). Tato energie se začne odebírat z vedlejšího energetického zdroje až do dosažení 80 kilometrů za hodinu. V tomto okamžiku vozidlo přestává akcelarovat, snižuje se množství odebírané energie a dochází k vypnutí vedlejšího (pomocného) zdroje a zapnutí hlavního zdroje (baterie). Po této situaci řidič uvolní plynový pedál a vozidlo začne motoricky brzdit, vzniká tzv. rekuperace.

Logika je realizována tak, že nejprve se začne dobíjet vedlejší zdroj energie, a až po nabití tohoto zdroje se začne nabíjet hlavní zdroj. Když nastává rekuperace, začne se odebírat energie z hlavní baterie, která také dobíjí vedlejší zdroj energie, což vede k rychlejšímu nabití tohoto zdroje. Existuje mnoho dalších způsobů dobíjení vedlejšího zdroje, jsou však mnohdy komplikované a závislé na různých parametrech vozidla a profilu trati. Podrobněji se těmito záležitostmi zabývá kapitola „Vícezdrojová jednotka elektromobilu“.

Hlavní bod této práce se zaměřuje na komparaci zadaných namodelovaných struktur. Bylo provedeno několik měření při různých rychlostech a terénních profilech za účelem porovnání celkové spotřebované energie z jednotlivých energetických zdrojů. Po zhodnocení výsledků bylo zjištěno, že u vícezdrojové jednotky elektromobilu je spotřeba energie nižší než u jednozdrojové, což má kladný vliv na životnost hlavního zdroje energie (baterie).

Jedna z možných alternativ provedení koncepce vozidla je využití palivového článku namísto běžných baterií. Nevýhodami baterií je jejich velká hmotnost, vysoká cena a nízká životnost, zatímco palivový článek je obdobou nádrže s fosilním palivem, s tím rozdílem, že při provozu nevznikají škodlivé emise. Palivový článek disponuje poměrně vysokou účinností, avšak jeho hlavní nevýhodou je vysoká cena a energetická náročnost výroby vodíku.

Při řešení této diplomové práce jsem si plně uvědomil aktuálnost zadané problematiky a význam úspory elektrické energie či nutnost omezení produkce škodlivých emisí. Pochopil jsem vzájemnou návaznost jednotlivých systémů a blíže se seznámil s funkčním řešením jak hybridních vozidel, tak elektromobilů. Při modelování jednotek elektromobilů jsem se zdokonalil v práci ve

vývojovém prostředí Matlab – Simulink. Téma mě seznámilo s řadou nových informací, zároveň jsem získal zkušenosti a přehled v řešené problematice.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KALIN, E. *Aplikace ultrakapacitorů v dopravních systémech*. Brno, 2008. 70 s. Doktorská práce na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí doktorské práce – Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.
- [2] VLK, F. *Alternativní pohony motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství vlk, 2004. 234 s. ISBN 80-239-1602-5.
- [3] KAMEŠ, J. *Alternativní pohony automobilů*. 1. vyd. Praha: BEN, 2004. 232 s. ISBN 80-7300-127-6.
- [4] VACULÍK, P. *Zdrojové struktury pohonných jednotek hybridních vozidel*. Ostrava, 2010. 42 s. Dizertační práce – Teze na Fakultě elektrotechniky a informatiky Technické univerzity Ostrava na Katedře elektroniky. Vedoucí dizertační práce – prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.
- [5] BÁRTOVÁ, D. – KUKAL, J. – PÁNEK, M. *Výpočetní technika II - Algoritmizace v systému MATLAB* [online]. c2000 [cit. 2012-02-01]. Dostupné z: <<http://vyukaap.vscht.cz/HTML/kap1.html>>.
- [6] Simulink. *Humusof* [online]. c2012 [cit. 2012-02-02]. Dostupné z: <<http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/simulink/>>.
- [7] Simulink. *Investice do rozvoje vzdělání* [online]. c2012 [cit. 2012-02-02]. Dostupné z: <<http://www.umt.fme.vutbr.cz/~ruja/vyuka/matlab/matlab07.pdf>>.
- [8] CENEK, M. – JINDRA, J. – JON, M. – KAZELLE, J. – KOZUMPLÍK, J. – VRBA, J. *Akumulátory od principu k praxi*. 1. vyd. Praha: FCC PUBLIC, 2003. 248 s. ISBN 80-86534-03-0.
- [9] HORČÍK, J. *Hybrid.cz* [online]. c2006 [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: <<http://www.hybrid.cz/slovnicek/hybridni-automobil>>.
- [10] Hybridní automobil. *Koncepty.cz* [online]. c2010 [cit. 2011-10-03]. Dostupné z: <<http://www.koncepty.cz/hybridni-automobil/>>.
- [11] Hybridní automobily 2. *Autocz* [online]. c2008 [cit. 2011-10-03]. Dostupné z: <<http://baracudaj.blog.auto.cz/2008-08/hybridni-automobil-2/>>.

[12] HORČÍK, Jan. *Hybrid.cz* [online]. c2009 [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <<http://www.hybrid.cz/slovnicek/elektromobil>>.

[13] Zdroj: [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: <http://www.aalcar.com/library/hybrid_service.htm>

[14] Zdroj: [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: <http://pandatron.cz/?2835&vut_ma_unikatni_elektromobil>

[15] Zdroj: [cit. 2012-01-25] Dostupné z: http://www.greencarcongress.com/2005/06/maxwell_introdu.html

[16] CHRIS, M. – MASRUR, A. M. – GAO, W. D. *Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives*. 1st printing, 2011. West Sussex: John Wiley & Sons, c2011. ISBN 978-0-470-74773-5.